

Génesis

Los orígenes del hombre y del Universo

John Gribbin

Biblioteca
Científica
Salvat

Génesis

Los orígenes del hombre y del Universo

John Gribbin

SALVAT

Versión española de la obra original inglesa
Genesis: The origins of man and the Universe,
publicada por Oxford University Press

Traducción: Lluís Daufí Rodergas
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass
Foto de cubierta: © A.G.E. FotoStock

Escaneado: thedoctorwho1967.blogspot.com
Edición digital: Sargont (2017)

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8974-5 (Volumen 94)
Depósito Legal: B-9194-1995
Publicada por Salvat Editores. S.A.. Barcelona
Impresa por Printer. i.g.s.a. Abril 1995
Printed in Spain

ÍNDICE

Para Jo y Ben,
que pudieran verse un día
trabajando en la *próxima* película sobre el mundo

AGRADECIMIENTOS

Éste es el libro que siempre quise escribir, incluso antes de saber que deseaba escribir libros, pudiéndose pues considerar toda mi vida como un aprendizaje que me ha llevado a elaborar la obra que tienen en sus manos. Por ese motivo, pudiera decirse que todo aquél a quien haya dirigido una pregunta (o sea, todos con quienes he topado) se merece mi agradecimiento por haber contribuido a incrementar mis conocimientos. Pienso especialmente en mis padres, que pudieran haber sofocado mis primeras muestras de curiosidad de haber sido menos comprensivos y haberme ayudado menos, y también en los libros de George Gamow y los programas de televisión de Jacob Bronowski cuyo impacto recibí a una edad en que es impresionable (sí, ya teníamos televisión entonces). Ya bastante adelante en la vida, aclaré la duda de lo que se podía hacer con un título de física cuando descubrí la posibilidad de proseguir estudios de cosmología —el estudio del Universo. También fue decisivo conocer a Bill McCrea, que dirigía el Centro de Astronomía de la Universidad de Sussex, pues fue él quien inspiró la fascinación que yo seguiría sintiendo por «el principio». En la Universidad de Cambridge, John Faulkner fue el primer profesor de universidad con quien yo trabajara que compartiera mi idea de que la ciencia había de ser algo divertido, lo cual resulta desafortunadamente tan poco frecuente en los círculos universitarios que vale la pena señalarlo. Durante más de diez años, me he ido manteniendo más o menos al corriente de los hechos relacionados con la cosmología, a pesar de haberme dedicado a otros temas, gracias sobre todo a la buena disposición de Martin Rees para comentar conmigo los últimos avances o, durante estos últimos años, para dirigirme a sus colegas del Instituto de Astronomía de Cambridge, donde ha adquirido tal notoriedad que no pueden sino ceder a sus «indicaciones» de que hablen conmigo (lo cual, por supuesto, hacen siempre de buena gana,

y me sirve de gran ayuda: doy las gracias, en particular, a David Hanes, Simón White y Michael Fall).

Aunque me empecé a interesar por la teoría actual sobre la tectónica de placas, sobre todo compartiendo una computadora con un grupo de trabajo de geofísica en Cambridge, no fue sino hasta trabajar para la publicación científica *Nature*, a principios de los años setenta, cuando descubrí que me hallaba ante una nueva teoría revolucionaria. Aunque mi cultura geofísica sea un tanto peculiar por haber aprendido en primer lugar los últimos avances, y haber retrocedido en los conocimientos, eso no ha supuesto para mí impedimento alguno. En esa educación hacia atrás me han ayudado mucho, en repetidas ocasiones, Dan McKenzie, en Cambridge, y Peter Smith, en la Open University. También trabajando en *Nature* tuve la oportunidad de descubrir los nuevos avances que existían en la investigación de los cambios climáticos. Para ampliar mis conocimientos sobre las «ciencias de la Tierra», desde el suelo hasta la atmósfera, conseguí, durante varios años, extraer valiosos conocimientos de Hubert Lamb y Michael Kelly, de la Universidad de East Anglia, y de Stephen Schneider y sus colegas del Centro Nacional Norteamericano de Investigación de la Atmósfera.

No obstante, todo esto tan sólo representa aproximadamente la mitad del libro, mientras que la parte más fascinante de mi estudio, durante los últimos años, ha sido la oportunidad, finalmente, de ir recogiendo información sobre la naturaleza, el origen y la evolución de la vida en la Tierra. La magnífica serie de televisión de David Attenborough me encauzó por ese camino al renovar en mí el interés que antes albergara por esos temas. Pero este tipo de programas hace que surjan inevitablemente tantos interrogantes como datos se dan a conocer, y me hubiera encontrado desatendido en mi esfuerzo por adentrarme en el tema de no haber contado con la colaboración de Roger Lewin (ahora en *Science*) y Jeremy Cherfas (ahora, en la Universidad de Oxford) en el *New Scientist*. La perspectiva de haber descubierto un área de conocimientos, nueva para mí, tan extensa —lo muestra este libro— como la suma de todas las

abordadas hasta ahora, hace que sea la suya la mayor contribución reciente a mi programa de perfeccionamiento autodidacta, y prometo (¿o suena a amenaza?) seguir extrayendo mucho más material de ese filón.

Individualmente, quien más me ha ayudado en esta obra, en particular, ha sido mi mujer, una investigadora con una habilidad especial para compilar, por una parte, todo el material necesario (ya sean libros, artículos, etc...) para que yo pudiera escribir, y que, por otra, me avisa, imparcialmente, y sin temor, si algún pasaje de mi texto no se entiende claramente. Sin ella, me hubiera sido imposible llevar a cabo esta obra.

Gracias, pues, a Lilla, Bill, George, Jacob. Bill. John, Martin, Dan, Peter, Hubert, Mick, Steve, David. Roger, Jeremy, y especialmente a Min; los errores, como suele decirse, se me tendrán que achacar exclusivamente a mí.

Lo más incomprensible del Universo
es que sea comprensible

ALBERT EINSTEIN

INTRODUCCIÓN

La pregunta “¿de dónde venimos?” es la más profunda que se puede formular, y la capacidad de plantearla es un criterio como cualquiera de los que se usan para distinguir entre especies inteligentes y especies que no lo son. Esta curiosidad se hace extensiva a nuestro entorno inmediato, puesto que los orígenes del hombre no pueden considerarse de manera aislada, sino sólo como parte de un misterio mayor que engloba los orígenes de la vida en la Tierra y el lugar de ésta en el Universo de estrellas y galaxias que vemos a nuestro alrededor. Un oso, por ejemplo, puede tener un interés natural en el hecho de que las abejas hagan miel y aniden en los árboles, pero hasta donde sabemos, el oso no medita acerca del misterio de por qué las abejas anidan en los árboles, ni especula sobre el origen de las celdillas hexagonales de que se compone el panal. Una característica distintiva de la vida humana, en lo que concierne a la vida en la Tierra, es preguntarse sobre el dónde y el cómo de nuestros orígenes y entorno, así como también (con bastante menos éxito) por *qué* el Universo tiene que ser de la manera que es.

En este libro he tratado de proporcionar una imagen global, destinada a un lector sin conocimientos científicos, de la respuesta más moderna y científica a la pregunta “¿de dónde venimos?”. Dado que la historia de la vida en la Tierra no puede separarse ni de la historia de la Tierra como planeta ni de la historia de nuestro Sol, del que dependemos para la luz y el calor, como estrella, una visión general tiene que extenderse por muchas disciplinas científicas y abarcar vastas dimensiones de espacio y de tiempo. Y puesto que la historia del Sol y de la Tierra depende de la naturaleza de la Galaxia de estrellas que nos rodea (la Vía Láctea) y del propio Universo, me parece oportuno empezar la historia desde el comienzo de éste, desde

el *Big Bang* de la creación, que ocurrió hace unos 15.000 millones de años.

Esto sólo ha sido posible gracias a los cambios revolucionarios que se han producido durante las dos últimas décadas en nuestro conocimiento sobre la Tierra y el Universo en general (y no fue lo menos importante el descubrimiento de que realmente *había* un comienzo definido para todo) y a los espectaculares avances en el estudio de los orígenes y evolución del hombre, con el descubrimiento de restos fósiles en el este de África y nuevos progresos en biología molecular, que se han combinado para cambiar la opinión establecida acerca de cómo hemos llegado a ser como somos de un modo más significativo que en cualquier otra época desde que Darwin diera a conocer sus ideas sobre la evolución. El resultado de todos estos cambios es que ha surgido una nueva imagen, tanto de la humanidad como del Universo en el cual vivimos. Pero demasiado a menudo, por desgracia, las diferentes partes de que se compone esta imagen han permanecido separadas. La ciencia se ha hecho tan especializada y dividida en compartimentos, con tanta cantidad de información para cada especialidad, que un antropólogo, pongamos por caso, puede que no sepa nada de astronomía, aparte de lo que aprendió en la escuela (que ahora podría estar perfectamente superado), mientras que un cosmólogo puede no saber más sobre la evolución humana que los datos que ha recogido del último programa de televisión.

Por supuesto que hay excepciones, y es posible encontrar un astrónomo, Carl Sagan, que escribe sobre la evolución de la inteligencia humana. Pero lo que la especialización tiende a encubrir es la manera de que todos los hilos puedan entretejerse en una imagen conjunta de la humanidad, de la Tierra y de nuestro lugar en el Universo. La integridad de la imagen resultante es, con toda seguridad, tan significativa como el detalle de cualquier parte del todo, y sugiere que realmente tenemos una buena comprensión de lo que sucede en el Universo y cómo hemos llegado a ser de la manera que somos. Pero hay que hacer una advertencia. Esta imagen es la mejor que tene-

mos, y parece más completa que nunca. No obstante, es improbable que sea la definitiva. A finales del siglo XIX, muchos científicos creyeron que ya se habían realizado todos los grandes descubrimientos y que la tarea que quedaba era simplemente poner los puntos sobre las íes de la ciencia. Conocían la naturaleza de los elementos químicos, el modelo de "bola de billar" de los átomos les parecía satisfactorio, y así sucesivamente. Pero ya a principios del siglo XX, esta cómoda imagen fue desmontada por la teoría de la relatividad, por las ideas de la mecánica cuántica y, más tarde, por el descubrimiento de que las partículas atómicas supuestamente "elementales" escondían la existencia de complejas jerarquías de otras partículas elementales.

Es muy posible que nuestra imagen actual del Universo, aparentemente completa, no signifique una comprensión definitiva, sino el final de otra fase del desarrollo científico, comparable con la imagen de la ciencia de finales del siglo pasado. De todas formas, es la mejor imagen que nunca hemos tenido de cómo son las cosas, y aunque todo vuelva a cambiar en el transcurso de los próximos diez años, puede que todavía sea interesante saber cuál era la situación a principios de los años ochenta. Por lo menos mi historia quizá sirva de diversión a la próxima generación, al ver nuestras pintorescas y anticuadas ideas. Una vez tomada la decisión de tratar de explicar el origen de "la vida, el Universo y todo" [1] en un volumen, el problema principal fue por dónde empezar. El conocimiento se desarrolló desde lo más próximo y familiar hacia fuera, y muchos libros de astronomía siguen aún el esquema tradicional, y pasan de nuestro hogar aquí en la Tierra, al Sol de que dependemos, para

[1] Un programa culto de radio de la BBC de finales de los setenta, "Guía del autostopista de la Galaxia", reveló que las respuestas a la "vida, el Universo y todo" eran cuarenta y dos, pero que nadie conocía la *pregunta*. Sir Fred Hoyle ha escrito: «Las respuestas no son importantes, las preguntas sí lo son.» Mi versión de la historia de la vida, del Universo y de todo puede que no sea tan sucinta como la de la "Guía del autostopista", y quizá no se ajuste al aforismo de sir Fred, pero la he abordado con el mismo espíritu con que Mallory abordó el Everest: "porque está ahí".

continuar hacia fuera en una escala cósmica hasta otros planetas del Sistema Solar, otras estrellas de nuestra Galaxia y el Universo en su conjunto. Este planteamiento es lógico pero está centrado en la Tierra, que da a entender, sin decirlo explícitamente, que somos algo especial y ocupamos un lugar especial en el Universo. Y, además, adolece de otra curiosa distorsión, que es resultado del modo en que vemos el Universo.

La práctica totalidad de la información que tenemos acerca del Universo en su conjunto nos viene dada por los análisis de las radiaciones electromagnéticas —luz, ondas de radio, rayos X, o lo que sea—, cada una de las cuales viaja a la velocidad de la luz, 3×10^{10} centímetros por segundo. Aunque sea una gran velocidad (3 seguido de 10 ceros centímetros en un segundo), el Universo es tan grande que la radiación electromagnética necesita mucho tiempo para llegar a nosotros desde otras estrellas y galaxias. Incluso en el caso de una estrella relativamente cercana, su luz tarda años en viajar a través del espacio y llegar a la Tierra, de manera que vemos la estrella como era hace años cuando la luz salió de ella. Mucho más lejos en el Universo, podemos detectar la luz de galaxias tan remotas que las vemos tal como eran hace millones, cientos de millones o incluso miles de millones de años, por una luz que ha estado todo este tiempo viajando. Así, en un sentido muy real, cuanto más lejos escudriñamos en el espacio con nuestros modernos instrumentos astronómicos, más retrocede en el tiempo nuestra visión.

En realidad, esto es una bendición para los astrónomos, puesto que les permite verificar algunas de sus ideas acerca de la evolución del Universo por comparación de las regiones más cercanas con las más lejanas, de hecho, por comparación de una fotografía reciente del Universo con otra de su juventud. Pero ello también significa que contar la historia del Universo empezando desde aquí y ahora en la Tierra, es contarla, en cierto modo, hacia atrás en el tiempo. Después de tener el atrevimiento de emprender la tarea de contar toda la historia de los

orígenes del hombre y del Universo, me pareció muy justo hacerlo como se debe y empezar por donde todas las buenas historias empiezan: por el principio.

JOHN GRIBBIN

I. EL ORIGEN DEL UNIVERSO

Al principio, no había nada en absoluto. Ésta es una idea muy difícil de entender, y una de las que provocan más desconcierto entre mucha gente que ha oído hablar de la teoría del *Big Bang*, la creación del Universo, tal como nosotros la consideramos, a causa de una enorme explosión de materia y energía. Por nuestra experiencia cotidiana, sabemos qué es una gran explosión: una concentración de materia que estalla en el espacio exterior, activada por algún proceso energético. Incluso me da la impresión de que muchos astrónomos tienen como imagen del *Big Bang* la explosión de una estrella (una supernova) ampliada hasta el máximo que su imaginación les permite.

Pero antes del *Big Bang* de la creación ni siquiera había un espacio vacío. El espacio y el tiempo, así como la materia y la energía, fueron creados en esa “explosión”, y no existía ningún “exterior” donde el Universo pudiera explotar, dado que, aun cuando acababa de nacer y empezaba su gran expansión, el Universo ya lo contenía todo, incluso todo el espacio vacío. La nueva y revolucionaria visión del Universo de Einstein, desarrollada a principios de este siglo, realizó dos cosas. Unificó la materia y la energía como dos aspectos de un todo mayor, con la implicación de que la materia puede convertirse en energía en circunstancias adecuadas, circunstancias que ahora sabemos que se dan en las estrellas y en las bombas nucleares. Y también unificó el espacio y el tiempo como diferentes aspectos de otro todo mayor, el espacio-tiempo, un tejido subyacente que proporciona la estructura básica del Universo, en cuyo seno es transportada la materia-energía, mucho menos significativa y que establece interacciones con el espacio-tiempo a través de las fuerzas de gravedad.

Una analogía corriente para representar el Universo en expansión (luego explicaré cómo sabemos que se expande) viene dada por el ejemplo imaginario de una hoja elástica de caucho,

salpicada de gotas de tinta, que se va estirando gradualmente. La hoja de caucho representa el espacio-tiempo, lo que solíamos considerar como espacio vacío. Las gotas de tinta representan concentraciones de materia, galaxias de estrellas que se separan las unas de las otras a medida que el "universo" de caucho se expande[2]. Y un detalle importante de esta analogía es que las galaxias de la hoja de caucho se apartan unas de otras, imitando la manera en que lo hacen las verdaderas galaxias en el verdadero Universo, pero no se mueven por el tejido o estructura del caucho, del mismo modo que las galaxias reales no se mueven por el tejido del espacio-tiempo.

Todo esto, no obstante, es adelantarse a los acontecimientos. La clave de la ciencia cosmológica es hoy el descubrimiento de que el Universo efectivamente se expande, y discutir la naturaleza de esta expansión antes de presentar la evidencia de que ocurre, es poner el carro delante del caballo. Pero sí sirve para mi objeto de empezar por el principio, y para dejar claro que el *Big Bang* supuso el comienzo de todo. No sólo materia y energía, haciendo explosión en el vacío, sino el vacío en sí, el espacio. Y no sólo el espacio, sino también su complemento, el tiempo, la otra faceta del tejido espacio-tiempo. El paso del tiempo, tal como lo conocemos, también empezó con el *Big Bang*; por tanto, puede carecer literalmente de sentido preguntamos qué pasó "antes" —quizá no hubo ningún "antes". Pero esto, como podremos ver, no impide que los cosmólogos especulen sobre lo que *pudiera* haber precedido al *Big Bang.*

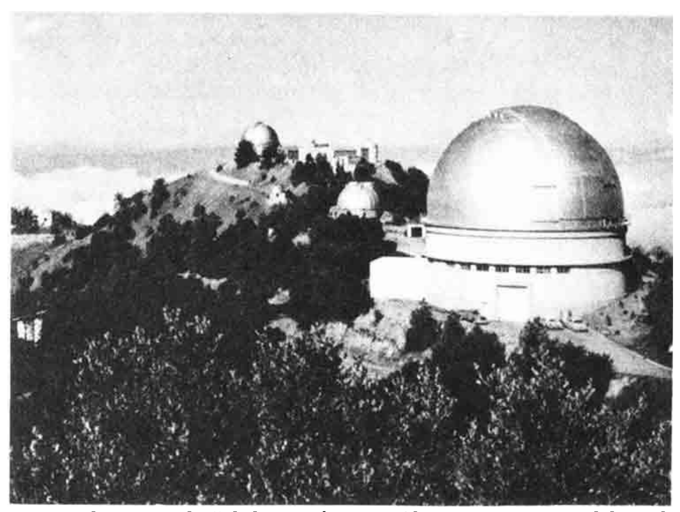
---

[2] Una convención que se utiliza en astronomía y cosmología es escribir con iniciales mayúsculas los nombres de nuestra Tierra. Luna, Sistema Solar y el Universo en el cual vivimos, mientras que las minúsculas se utilizan para las lunas de Marte, por ejemplo, y para un universo imaginario (incluso uno tan simple como el de la hoja de caucho) usado como "modelo" para hacer comprender la teoría. Yo seguiré esta convención; en particular, cualquier descripción del Universo se refiere a cómo creemos que es en realidad nuestro entorno, mientras que si me refiero a un universo (o a un modelo de universo) estoy hablando sobre algo probablemente muy interesante, pero que no se cree necesariamente que sea la descripción de las cosas tal como son realmente.

LA COSMOLOGÍA MODERNA Y LA PARADOJA DE OLBERS

La cosmología teórica —el estudio del origen y la evolución del Universo— dio comienzo, en su forma moderna, en los años veinte, después de la publicación, en 1917, de un texto científico de Einstein, en el que se describía cómo las ecuaciones de la relatividad general podían utilizarse para explicar el comportamiento del espacio-tiempo a gran escala. La cosmología se desarrolló realmente entonces, ya que al mismo tiempo se constituyeron los grandes telescopios modernos, que revelaron por mediciones directas el hecho de la expansión del Universo. Pero en un sentido estricto, los desarrollos teóricos llegaron, por lo menos, con un siglo de retraso, por la sencilla razón de que lo que se conocía en los años veinte del siglo pasado era suficiente para revelar que el Universo se expande, y si esta interpretación se hubiera llevado a cabo en aquel tiempo, podríamos tener ahora unas teorías cosmológicas del siglo XIX muy interesantes, anteriores a la relatividad. De todas formas, quizás era inevitable que el verdadero progreso sólo pudiera tener lugar cuando la teoría y la observación trabajaran unidas y apuntaran en la misma dirección. Aun así, vale la pena echar un vistazo a la evidencia, que no requiere más equipo de observación que el ojo humano y que es suficiente por sí sola para sugerir la expansión del Universo, y por tanto para deducir que hubo un *Big Bang* de la creación en el que se inició la expansión.

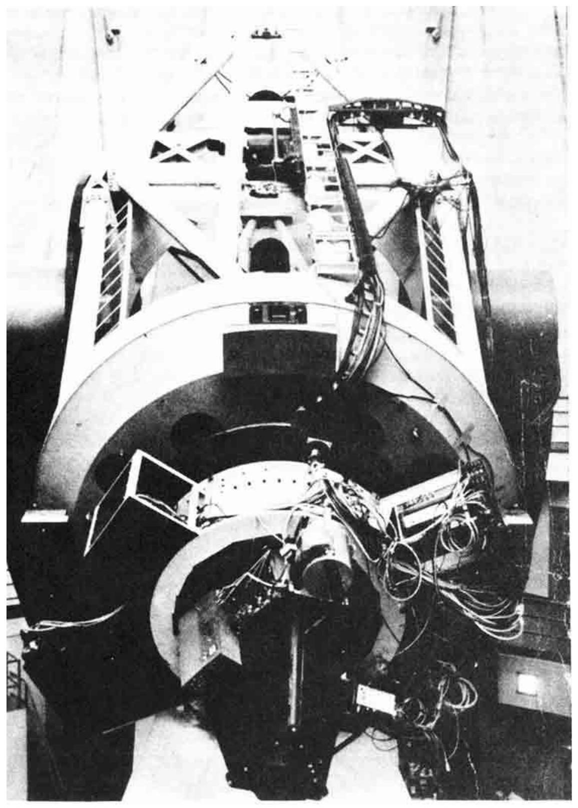
El astrónomo alemán Heinrich Olbers publicó, en 1826, la paradoja que lleva su nombre, aun cuando no fue el primero en especular sobre el significado del oscuro cielo nocturno. Hace un par de siglos, las pocas personas que reflexionaban sobre la naturaleza del Universo aceptaban en su mayoría que éste debía ser, a gran escala, uniforme, inmutable y estático. Esto se consideraba más cierto que cualquier otra cosa; la idea de cambio en el Universo simplemente no estaba de moda. Pero, como Olbers y otros advirtieron, un universo uniforme, inmutable y estático no encajaba en el hecho de que el cielo se oscureciera por la noche.



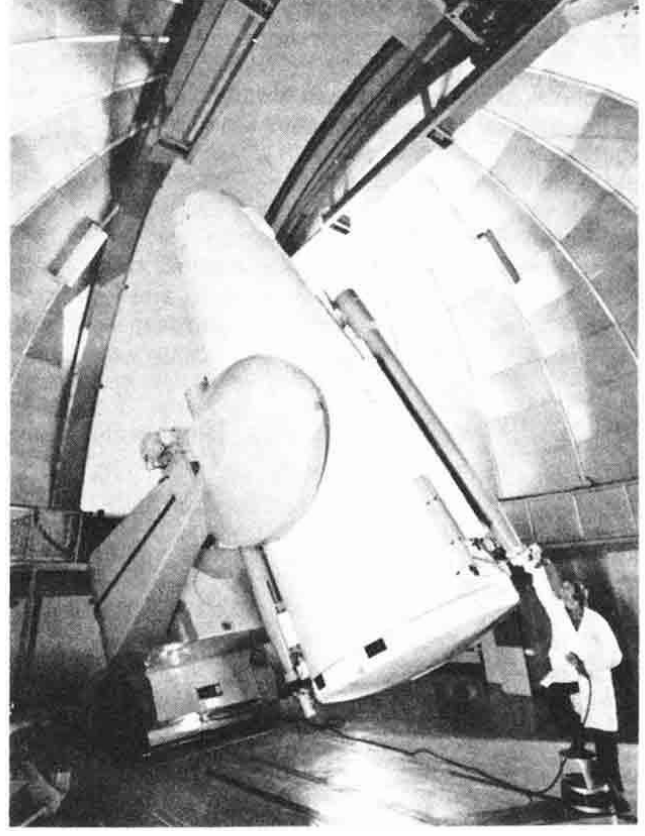
Las “sondas espaciales” de los astrónomos. Observatorios como el de Lick se hallan situados en las cimas de las montañas, por encima de las nubes. (*Fotografía cortesía del Lick Observatory*.)

Esta paradoja puede presentarse tanto en términos sencillos, de sentido común, como en lenguaje matemático. En términos corrientes, si el Universo es infinito —si el “arriba” se extiende indefinidamente— y está lleno de estrellas (o galaxias), entonces, en cualquier dirección que uno mire, debería ver la brillante y resplandeciente superficie de una estrella. De modo que todo el cielo de la noche debería ser un resplandor de luz. Las matemáticas dicen lo mismo, quizá, pero con más fuerza. Para comprender mejor el Universo en su conjunto (o, en este caso, el estático modelo de universo de Olbers y sus contemporáneos), podemos fijamos en una parte típica del mismo y luego extender las características propias de esa parte al todo. Desde nuestro punto de vista como terrícolas, una parte típica de lo que nos rodea en el espacio, suponiendo que lo que nos rodea es lo mismo en todas direcciones (isótropo), es una delgada y esférica capa de espacio cuyo centro ocupamos nosotros. El forro de una pelota es una capa esférica alrededor de su centro; la atmósfera de la Tierra es una capa esférica a una

escala mayor, pero las capas esféricas de nuestro modelo son a una escala todavía mayor y comprenden enjambres de estrellas y galaxias.



En el interior de las cúpulas, modernos telescopios llevan adosados aparatos electrónicos para exprimir toda la información posible de la luz que llega a la “estación final de trabajo”. *(Fotografía cortesía del Lick Observatory.)*



Cuando se requieren fotografías reales del firmamento se utiliza una cámara especial denominada telescopio de Schmidt. *(Fotografía cortesía del Science Research Council.)*

Si imaginamos una típica capa delgada, a una distancia R de nosotros, la cantidad de estrellas y galaxias brillantes que contiene será simplemente la densidad promedio de estrellas y galaxias brillantes que hay en el Universo multiplicada por el volumen de la capa. Y resulta que el volumen de esta capa es,

sencillamente, su grosor multiplicado por el cuadrado de su radio: R^2. Con el supuesto básico de la uniformidad del Universo, aun cuando algunas de esas estrellas y galaxias sean más brillantes que el promedio, y otras más mortecinas que el promedio, podemos decir que, aproximadamente, las brillantes y las mortecinas se compensan, y considerar que todo objeto que resplandece en la capa en cuestión tiene un brillo promedio. El brillo o intensidad de la luz de las estrellas y galaxias de la capa es exactamente el brillo de una estrella o galaxia de término medio multiplicado por el número de estrellas o galaxias, de manera que el brillo de la capa también depende de R^2.



El gran plato de Jodrell Bank, en Inglaterra, se ha convertido en el símbolo de la moderna ciencia de la radioastronomía.

Pero éste no es el final de la historia. A nosotros, que estamos en el centro de la capa, la luz se nos aparecerá más débil,

del mismo modo que las luces de una dudad en el horizonte aparecen más débiles que el haz de luz de una linterna cercana a nosotros. Y sabemos, por haber estudiado el comportamiento de la luz, que el brillo aparente de un foco es el equivalente de un brillo real *dividido* por el cuadrado de su distancia, R^2. No es ninguna coincidencia; la razón de que el mismo factor de conversión que es pertinente para las capas esféricas reaparezca de nuevo se debe a que la luz se difunde desde un foco central de manera uniforme en todas direcciones, y llena una esfera cuyo tamaño crece constantemente. De modo que la misma clase de números aparecen una vez más.

El ejemplo más simple lo tenemos en dos capas de radio R y $2R$. La capa más distante contiene cuatro veces más galaxias (número proporcional a R^2), pero cada una de ellas tiene la cuarta parte de brillo de las galaxias más cercanas (brillo proporcional a $1/R^2$). De forma que cada capa contribuye exactamente igual en la cantidad de luz percibida.

La importancia de esto es crucial para la paradoja de Olbers. Por cuanto que el brillo de *cualquier* capa de espacio que nos rodea, visto desde la Tierra en el centro de la capa, es independiente del radio, puesto que R^2 compensa la ecuación. En un universo uniforme, estático e inmutable, cualquier pequeño volumen alrededor nuestro contribuye al brillo del cielo con la misma cantidad de luz que cualquier otro. En un Universo infinitamente grande, todas las capas brillantes por separado se sumarían para producir un cielo infinitamente brillante, lo cual es claramente un disparate; de ahí la paradoja. Y lo que eso demuestra es que por lo menos una de las hipótesis de Olbers tiene que estar equivocada, como descripción del Universo real.

Quizás el Universo sea realmente muy pequeño, con una "frontera" definida, más allá de la cual no hay más estrellas y galaxias que contribuyan al brillo del cielo nocturno. Esto resolvería la paradoja; pero con los modernos telescopios es posible ver a muy larga distancia en el Universo, y desde luego mucho más lejos de donde debería estar la frontera, si ésta fuera la verdadera solución de la paradoja. Por otro lado, el Universo

podría no ser igual en todas partes; si las galaxias más lejanas tienen un brillo débil, entonces poca luz podrá aportar después de todo. Pero ésa es, realmente, la misma explicación que la anterior, sólo que en lugar de una frontera lo que hay es una debilitación gradual del brillo, a medida que nos alejamos. Y, también aquí, podemos ver lo suficientemente lejos para saber que, si bien hay diferencias entre las galaxias cercanas y las lejanas (ya lo veremos posteriormente en este mismo capítulo), estas diferencias no son del tipo adecuado para eliminar la paradoja.

EL UNIVERSO QUE SE EXPANDE

Eso nos deja una alternativa. El Universo como un todo debe estar cambiando, y en particular debe estar expandiéndose. En este caso, la luz procedente de fuentes distantes se debilita no sólo en proporción a R^2, sino por otro factor, que es el de “rellenar” el espacio nuevo que se crea por la expansión del Universo. Durante el recorrido, la luz es literalmente estirada hacia longitudes de onda más largas que corresponden al extremo rojo del espectro óptico: un desplazamiento, o corrimiento, hacia el rojo. Ninguna energía se ha perdido en el proceso, sino que la energía disponible se ha extendido y se ha hecho más tenue.

Ahora bien, ésta es una explicación muy nítida de la naturaleza del Universo real que se basa en unas cuantas observaciones muy sencillas y en un simple, aunque poderoso, razonamiento teórico para determinar el hecho quizá más básico de la vida: que el Universo se expande[3]. Curiosamente, sin embargo, ésta no fue la manera como los cosmólogos llegaron a hacer

---

[3] Algunas personas se preocupan ante la idea de un Universo en expansión infinitamente grande y se preguntan “¿qué es mayor que infinito?”. La respuesta es “más infinito”, y la expansión no es un simple truco matemático, puesto que tiene efectos reales, físicos. Lo que ocurre es que la densidad del Universo decrece —las galaxias se distancian las unas de las otras— de la misma forma en que lo hace el estiramiento de la luz y de otras radiaciones electromagnéticas.

este descubrimiento. El desplazamiento hacia el rojo en la luz procedente de galaxias lejanas fue descubierto, para desconcierto de los teóricos, cuando todavía creían (a pesar de la paradoja de Olbers) que el Universo era inmutable. Sólo cuando este descubrimiento derribó el castillo de naipes de sus teorías empezaron a tomarse en serio el modelo de Universo en expansión.

Por lo tanto, la cosmología teórica empezó de verdad, como disciplina científica, en 1917, cuando Einstein publicó un trabajo en el que demostraba que las ecuaciones de la relatividad general podían aplicarse a la descripción del comportamiento del Universo en su conjunto. Lo que las ecuaciones realmente describen es la geometría del espacio-tiempo, y aunque ya se habían utilizado con gran éxito para abordar problemas relativamente “locales” (el más famoso de los cuales quizá fue la predicción de que la luz de una estrella se desvía al pasar cerca del Sol, efecto que podría observarse durante un eclipse, como así fue), Einstein quería aplicarlas a la descripción de *todo* el espacio-tiempo, del Universo entero. Intentó hacerlo de acuerdo con los conocimientos de aquel tiempo, que aún sustentaban (¡hace sólo medio siglo!) el modelo de un universo isotópico, homogéneo y estático. Pero fracasó. Encontró que podía mantener la isotopía y la homogeneidad sin dificultad, pero aun los modelos más sencillos construidos con las ecuaciones de la relatividad eran no estáticos. Siempre se encontró con universos que se expandían o bien que se contraían, pero nunca con universos que permanecieran quietos. Para hacer que las ecuaciones encajaran con la clase de universo que los astrónomos creían que existía, Einstein tuvo que introducir un factor extra, que él llamó “constante cosmológica”. Con franqueza, hizo una chapuza con las ecuaciones. Y más tarde Einstein tuvo que reconocer que aquello fue el error científico más grande de su vida.

Pero el motivo de la chapuza pronto desapareció, a pesar de que la constante cosmológica persistió en la teoría de la cosmología hasta los años sesenta. Durante los años veinte, tanto

la teoría como la observación cosmológicas empezaron a desarrollarse. La teoría fue mejorada por el físico ruso Aleksandr Fridman, que desarrolló lo que luego serían las soluciones estándar de las ecuaciones de Einstein en 1922. Estos modelos de Fridman —que hasta hoy siguen constituyendo la base de la cosmología matemática— describen el comportamiento del modelo del universo isotrópico y homogéneo, con constantes cosmológicas o sin ellas, y distinguen entre dos tipos básicos. La distinción entre las dos familias de modelos de universo depende sólo de una propiedad física, de un parámetro: la densidad de materia que presenta el Universo.

Todos estos modelos (dejando aparte el error de la constante cosmológica) implican expansión o contracción, o ambas cosas. Una versión muy rara se inicia con un universo infinitamente grande, con la materia esparcida de manera muy tenue, y que se concentra hasta llegar a un punto matemático infinitamente denso, una singularidad. Es evidente que este modelo no representa el Universo real, que sabemos que se expande, que no se contrae. Pero las otras dos familias básicas pueden adaptarse a las observaciones que hacemos del Universo.

Ambas *empiezan* a partir de una singularidad y se expanden hasta llegar a estados de menor densidad, que hoy significan galaxias (o con más exactitud, *enjambres o cúmulos* de galaxias), que se separan unas de otras, llevadas del estiramiento del tejido del espacio-tiempo. Pero, según la cantidad de materia que haya en el Universo, las ecuaciones nos indican que o bien esta expansión continuará literalmente para siempre, o bien que la atracción gravitacional de toda la materia puede un día detener la expansión, y después invertirla hasta el colapso del Universo. Un universo que experimenta una eterna expansión se denomina, por razones obvias, “abierto”; igual de obvio es que el nombre genérico de la familia de universos que desembocan en un colapso gravitacional sea el de “cerrado”. Y puede establecerse una analogía entre la situación abierta o cerrada de un universo y la velocidad crítica de escape de un cohete u otro proyectil que parta desde la Tierra.

A medida que el proyectil trata de salir del campo gravitacional de la Tierra, pierde energía, lo cual significa que va más despacio. Si lleva la velocidad suficiente, podrá escapar de la influencia de la gravedad terrestre; pero si lleva una velocidad menor que la de escape, perderá toda su energía y caerá de nuevo en la Tierra. En el caso de un planeta de mayor masa que la Tierra, pero del mismo tamaño, un cohete que parta desde su superficie necesitará más energía —una velocidad inicial mayor— para escapar. De modo que la pregunta es: ¿impulsó el *Big Bang* al Universo que se expande con un ímpetu inicial suficientemente grande para superar la “velocidad de escape” correspondiente a toda la masa junta del Universo?[4]

Como ponen en claro los modelos de Fridman, si la densidad de la materia del Universo es menor que cierta cantidad crítica, entonces el Universo es abierto y debe expandirse por siempre; es infinitamente grande, y siempre lo ha sido, incluso inmediatamente después del *Big Bang,* cuando su densidad era también muy grande. Pero si la densidad de la materia es hoy mayor que la cantidad crítica, entonces el Universo es curvado sobre sí mismo y cerrado —es finito, pero ilimitado—, como la superficie de una esfera. Una superficie esférica —la superficie de la Tierra, por ejemplo— es finita en extensión porque tiene una cierta área finita. Pero no tiene límites; si se viaja por la superficie en línea recta, no se llega al límite del mundo, sino que, al final, se regresa al lugar desde donde se partió. La diferencia está en que la superficie de la Tierra es bidimensional, envuelta alrededor de la tercera dimensión del espacio. El espacio del Universo es tridimensional (y el espacio-tiempo es

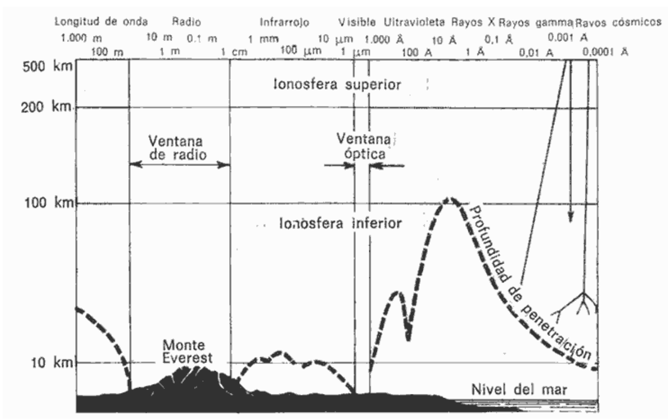
---

[4] La situación real es un poco más sutil que todo esto. Las ecuaciones de Einstein describen cómo un campo gravitacional “curva” el espacio-tiempo, y la cuestión está en si la propia gravedad de todo el Universo es suficiente o no para curvar el espacio-tiempo sobre sí mismo, de lo que resulta un Universo cerrado, o si se curva, pero se mantiene abierto. La analogía de la velocidad de escape se derrumba si se intenta aplicar a un universo infinito, porque ello implicaría que la masa podría ser infinita y. por tanto. la velocidad de escape también; pero la analogía ayuda, creo yo. a adquirir la intuición necesaria para saber lo que ocurre; poca gente tiene la intuición del concepto de espacio-tiempo curvo.

cuatridimensional), de manera que para construir un universo cerrado tiene que haber, en cierto sentido, por lo menos una dimensión "extra" alrededor de la cual tuviera lugar la curvatura. Estamos, nuevamente, ante un concepto difícil de entender, a menos que uno sea un matemático, pero el concepto ahí está. No obstante, cualquier dificultad queda ciertamente compensada por el hecho de que un universo finito pero sin límites tiene un tamaño definido, y por tanto no debemos preocupamos por el concepto de infinito. (Pero hay que tener en cuenta que el tamaño del Universo real es muy grande, tan grande que, sin la expansión, la paradoja de Olbers sería todavía aplicable. La diferencia entre "muy grande" e "infinito" puede que no sea mucha, en términos prácticos, para el lector y para mí, pero aun así hace que las matemáticas sean más accesibles.)

Un universo cerrado comparte una propiedad importante con una superficie planetaria: si se viaja en línea recta a través del espacio, se llegará finalmente al punto de partida, desde el otro lado, después de circunnavegar el universo entero.

Para nuestro propio Universo, la densidad crítica de materia que sería suficiente para detener el colapso es ahora de unos 10^{-30} gramos por centímetro cúbico (un punto decimal seguido por 30 ceros antes del 1). Cuando el Universo era más pequeño, y más denso, se expandía también más rápidamente (piénsese en el cohete lanzado al espacio y que gradualmente pierde velocidad), así que esta cifra se refiere al Universo tal y como lo conocemos ahora, con la tasa de expansión observada. Si lo hubiéramos observado hace miles de millones de años, habríamos visto un Universo con una expansión más rápida y con mayor densidad, pero dado que la tasa a la que la expansión disminuye (el parámetro de deceleración) depende de la densidad de cada momento (o época) cósmico, si la cantidad de materia que vemos ahora es suficiente para cerrar el Universo, podemos estar seguros de que el cierre ha estado fijado permanentemente desde el principio, desde el propio *Big Bang.*



Las observaciones efectuadas desde el suelo vienen limitadas por la intensidad con que la radiación penetra la atmósfera de la Tierra. La “ventana” óptica solamente fue accesible a astrónomos como Hubble, que fue el primero en desarrollar la relación distancia/desplazamiento hacia el rojo. Y sólo la “ventana” de las ondas de radio ha proporcionado un nueva imagen del Universo desde los tiempos de Hubble. Pero al elevar los instrumentos por encima de las capas oscurecedoras de la atmósfera en globos, cohetes y satélites, los astrónomos de los años ochenta consiguen hacer observaciones del Universo en toda la extensión del espectro electromagnético.

Una vez los modelos de Fridman mostraron la importancia crítica de la relación entre el parámetro de deceleración y la densidad del Universo, les tocó a los observadores realizar los tests vitales: por una parte, tratar de determinar a qué velocidad se expande el Universo, y por otra, medir, de alguna manera, la densidad de la materia del Universo, por lo menos en nuestro alrededor cósmico inmediato. Nada de ello fue fácil, y aunque 10^{-30} gramos por centímetro cúbico podría parecer una densidad bastante pequeña, los cálculos más simples (mediante la conjetura de la masa de una galaxia, la determinación del número de galaxias que hay en un gran volumen de espacio próximo a nosotros, y el cálculo de la densidad de la masa a partir de estos datos) pronto mostraron que el Universo real está si-

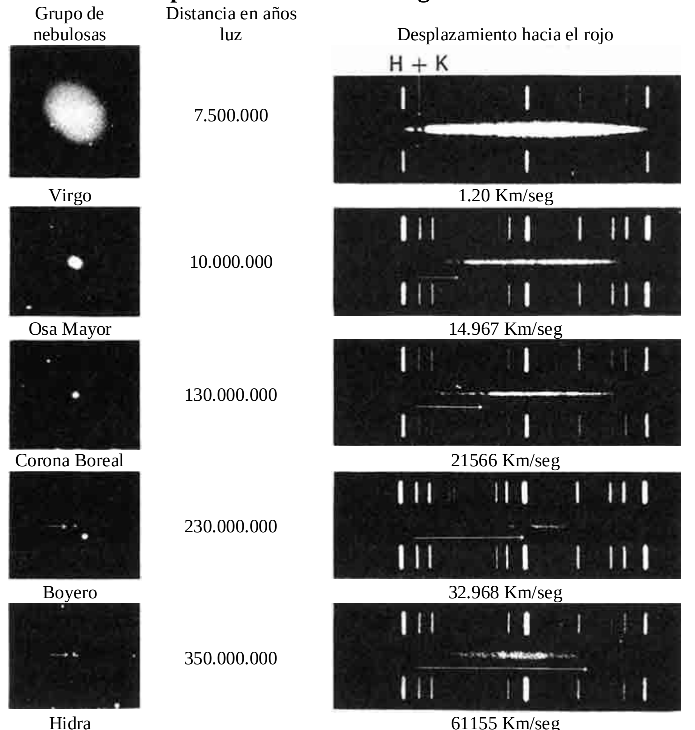
tuado bastante cerca de la línea divisoria entre abierto y cerrado, requiriéndose mediciones muy precisas para determinar con exactitud a qué lado de la línea está realmente.

LA NATURALEZA DE LAS GALAXIAS

Las observaciones cruciales que empezaron a revelar que el Universo se expande se realizaron en la misma década, 1910-1920, en que Einstein comenzaba a aplicar sus ecuaciones de la relatividad a la descripción del Universo entero. Pero hasta bien entrados los años veinte no empezó a surgir una comprensión real de la naturaleza de la expansión, gracias a nuevas observaciones. Todavía a principios del siglo XX, se creía que nuestra propia Galaxia de la Vía Láctea —la masa de estrellas que vemos en el cielo nocturno— representaba todo el Universo. Se descubrieron diversos objetos no estelares (a los que se dio el nombre de nebulosas), pero en un primer momento se consideró que eran nubes brillantes de gas situadas entre las estrellas. Algunos, efectivamente, resultaron ser eso; pero muchos otros eran verdaderas galaxias, grupos de estrellas como nuestra Vía Láctea, pero tan lejanos que parecían pequeñas manchas luminosas, incluso en las fotografías tomadas con los modernos telescopios.

Una galaxia, como la nuestra, puede contener miles de millones de estrellas. Pero en una nueva visión espectacular, el descubrimiento de tantas y tantas galaxias diseminadas por todo el espacio más allá de la nuestra, convirtió esta impresionante agrupación de materia en un remanso cósmico. Este fue, probablemente, el paso más importante para invalidar la antigua idea de que la Tierra era el centro del Universo. En el transcurso de tres o cuatro siglos, esta visión antropocéntrica se sustituyó por la idea de que la Tierra era sólo un insignificante planeta que gira alrededor del Sol, más tarde por el descubrimiento de que el Sol era una insignificante estrella entre las muchas que forman la Galaxia, y ahora por la evidencia de que nuestra Galaxia sólo es una insignificante isla estelar entre las miles de millones diseminadas por el mar del espacio.

Relación entre desplazamientos hacia el rojo y distancias para las nebulosas extragalácticas



Los desplazamientos se expresan en forma de velocidades, c dλ/λ. Las flechas indican desplazamiento por las líneas de C, H y K. Un año luz es igual a 9,4607 billones de km, o sea, $9,4607 \times 10^{12}$ km.

La clave para determinar la escala del Universo la proporciona el desplazamiento hacia el rojo. Las rayas del espectro luminoso procedentes de galaxias lejanas se hallan desplazadas hacia el extremo rojo del espectro, lo que indica la existencia de una velocidad de recesión. Esta velocidad es proporcional a la distancia a que se halla de nosotros la fuente luminosa; de este modo, el desplazamiento hacia el rojo facilita una medida directa de la distancia a lo largo del Universo. En estas imágenes, de los Hale Observatories, la doble línea visible en el espectro, señalada por una flecha, se ve tanto más a la derecha —hacia el rojo— cuanto más distante se halla la fuente luminosa. *(Fotografía de los Hale Observatories*.)

Incluso antes de que se estableciera la naturaleza extragaláctica de algunas nebulosas, los astrónomos, al estudiar sus espectros, encontraron una prueba evidente de su movimiento respecto a nosotros. La luz de una estrella lleva una “firma” característica de los elementos químicos presentes en la atmósfera de la estrella, en especial hidrógeno y helio. Esta firma reviste la forma de configuraciones de líneas en el espectro de la luz, configuraciones que son fácilmente visibles con la ayuda de un espectroscopio, dispositivo que separa los diferentes colores que componen la luz, que presentan unas longitudes de onda exactamente definidas y con la singularidad de unas huellas digitales. No obstante, si un objeto se mueve hacia nosotros, cualquier luz que recibamos de él nos llega con su longitud de onda comprimida y desplazada hacia el extremo azul del espectro; en el caso de objetos que se alejan de nosotros, tiene lugar el efecto opuesto, un desplazamiento hacia el rojo. Por lo tanto, cuando los astrónomos vieron que la luz procedente de las nebulosas contenía líneas que se encontraban desplazadas en comparación con las longitudes de onda en las que las líneas se producían en el laboratorio, dedujeron que las nebulosas se movían respecto a la Tierra.

Al principio no parecía haber una norma para esos movimientos. Algunas nebulosas, como la gran nebulosa en espiral de Andrómeda, mostraban desplazamientos hacia el azul en sus espectros, lo que indicaba que se movían hacia nosotros. Otras mostraban desplazamientos hacia el rojo, que indicaban que se alejaban. Pero a medida que se hicieron más y más observaciones, surgió una norma. En primer lugar, los pioneros de la observación moderna, encabezados por el norteamericano Edwin Hubble, demostraron que muchas nebulosas eran, en realidad, verdaderas galaxias, junto a la Vía Láctea. Después, Hubble, casi en solitario, observó que sólo muy pocas (y cercanas) galaxias mostraban desplazamientos hacia el azul, y que la mayoría se alejaban de nosotros, con una velocidad de recesión que aumentaba cuanto más alejadas estaban. Por último, Hubble formuló la regla, que hoy se conoce como ley de Hubble: el desplazamiento hacia el rojo de la luz de una galaxia distante

es directamente proporcional a la distancia que la separa de nosotros.

Las observaciones decisivas se hicieron con una serie de grandes telescopios construidos en montañas de California. El reflector de 15 cm situado en el monte Wilson, acabado en 1908, era un gigante para aquella época y fue seguido por otro de 25 cm en el mismo observatorio, en 1917, y por otro de 50 en monte Palomar, en 1948. Hubble trabajó con todos estos instrumentos y, de 1919 en adelante, en el observatorio de monte Wilson, demostró en primer lugar que las nebulosas externas podían resolverse en estrellas (al menos las más cercanas a nosotros), y después calculó la distancia hasta la galaxia de Andrómeda (nuestro gran vecino más cercano) y otras.

La medición de las distancias es toda una leyenda, que se desarrolla a partir de una serie de evidencias. Las mediciones directas sólo pueden realizarse en el caso de las estrellas más cercanas, y mediante técnicas que dependen de la manera en que parecen moverse alrededor del cielo, al moverse la Tierra alrededor del Sol en su órbita; se trata de efectos de paralaje, algo parecido a la manera en que los postes del alumbrado, vistos desde la ventana de un vehículo en marcha, parece que se muevan rápidamente y, en cambio, las distantes colinas parece que se muevan más despacio. En efecto, la técnica de la paralaje da su nombre al patrón astronómico básico, “la paralaje de un segundo de arco”, o parsec. Si una estrella está lo suficiente lejos de nosotros que aparentemente recorre un segundo de arco cuando la Tierra recorre una distancia equivalente a la que hay entre la Tierra y el Sol, significa que se encuentra a una distancia de un parsec, y desde esa estrella el radio de la órbita de la Tierra abarcaría exactamente un segundo de arco. Éste es un ángulo bastante pequeño (hay 360 grados en un círculo, 60 minutos en cada grado y 60 segundos en cada minuto). A una distancia de un parsec, toda la órbita de la Tierra alrededor del Sol abarcaría sólo dos segundos de arco en el cielo; sin embargo, esta distancia es tan pequeña a escala cósmica, que no hay otras estrellas a un parsec del Sol.

Para relacionar esta escala de distancias cósmicas con los patrones cotidianos, es conveniente usar una unidad muy querida por los escritores de ciencia-ficción, pero que raramente emplean los astrónomos: el año luz. No tiene nada que ver con el tiempo, sino que se trata de la distancia que recorre la luz en un año. A una velocidad de unos 3×10^{10} (3 seguido por 10 ceros) centímetros por segundo, la luz recorre $9{,}4607\times10^{12}$ kilómetros por año, 63.240 veces la distancia media de la Tierra al Sol. Un parsec representa algo más de 3,25 años luz, y la estrella más cercana al Sol está a 4,3 años luz. Las distancias astronómicas se dan por lo general en miles de parsecs (kiloparsecs, kpc) o en millones de parsecs (megaparsecs, Mpc).

Nuestra propia Galaxia de la Vía Láctea está formada por unos 100.000 millones de estrellas esparcidas por un disco de 30 kpc (unos 100.000 años luz) de diámetro y algo más de 1/2 kiloparsec (unos 2.000 años luz) de espesor. En toda esta inmensidad, literalmente sólo unas pocas estrellas están lo bastante cerca para que las distancias puedan medirse por paralaje, pero una técnica afín, el método de los cúmulos en movimiento, constituye el siguiente escalón en la gama de mediciones. Un grupo de estrellas cercano (o cúmulo estelar) que se mueven juntas por el espacio da la impresión, desde la Tierra, de que convergen en un punto del espacio, del mismo modo que los raíles del ferrocarril parece que se unen en un punto del horizonte. Calculando la velocidad de las estrellas de un cúmulo (que puede requerir años de observaciones, a medida que las estrellas se mueven lentamente a través del espacio) e identificando el punto de convergencia, puede determinarse la distancia que hay hasta el cúmulo y hasta cada una de las estrellas. Y, afortunadamente para la astrología y la cosmología, hay un gran cúmulo estelar lo suficiente cerca de nosotros para que esta técnica funcione, y que contiene una rica variedad de estrellas todas ellas esencialmente a la misma distancia de nuestro Sistema Solar.

Se trata del cúmulo de las Híades, a menos de cincuenta parsecs: un grupo de estrellas que se mueven juntas a través del

espacio a una velocidad de 43 km por segundo. El cúmulo contiene unas 200 estrellas esparcidas en unos tres o cuatro parsecs, suficiente para dar una idea de cómo el brillo aparente de una estrella en el cielo está relacionado con su distancia real y con otras propiedades, como su color. En la actualidad, las mediciones de las distancias se empiezan a registrar estadísticamente, relacionando su color, distancia y brillo aparente para tantas estrellas como sea posible. Y las estadísticas han hecho posible un descubrimiento decisivo: una clase de estrellas, las variables cefeidas, presentan ciclos de pulsaciones que dependen sólo del brillo real (esto es, del calor) de cada estrella.

Una cefeida primero brillará, luego amortiguará el brillo y de nuevo brillará, todo ello en un período de entre dos y cuarenta días. Pero su período exacto —por ejemplo, diez días y medio— depende exclusivamente de lo brillante que sea (por término medio). Las razones de todo ello se comprenden perfectamente en términos de equilibrio entre las reacciones nucleares que mantienen la estrella caliente (más información en el capítulo 3) y las fuerzas gravitacionales que la comprimen. Pero lo que realmente importa para determinar la distancia es que si se conoce el brillo real de una estrella, la distancia puede encontrarse con rapidez y precisión por medio de su brillo aparente en el cielo, utilizando la familiar ley del cuadrado inverso (brillo aparente = brillo real/distancia^2).

Este es el eslabón clave de la cadena. Las cefeidas pueden distinguirse de las demás estrellas de la masa de la Vía Láctea, y ayudar a formamos una idea del tamaño de nuestra propia Galaxia. Y Edwin Hubble encontró cefeidas entre las estrellas de la galaxia de Andrómeda y otras galaxias cercanas, hecho que puede calificarse de crucial.

A través de estas distancias, incluso el tamaño de una galaxia empieza a convertirse en un efecto “local” de pequeña escala, y las primeras estimaciones de las distancias que nos separan de las nebulosas extragalácticas, como la de Andrómeda, se han deducido del promedio de las distancias indicadas por las pulsaciones de diferentes cefeidas situadas entre sus estre-

llas. Ahora sabemos que nuestra vecina más *cercana* en Andrómeda está a una distancia de casi 700 kpc, tan remota que la vemos por una luz que salió de ella hace más de dos millones de años; y el indicador cefeida puede utilizarse hasta distancias de unos 3 Mpc (10 millones de años luz), unas 100 veces el diámetro de nuestra propia Galaxia. Esto nos proporciona un apoyo en la escalera de las verdaderas distancias cosmológicas, pero en términos cosmológicos este 3 Mpc es todavía nuestro propio patio.

DESPLAZAMIENTOS HACIA EL ROJO Y LA ESCALA DEL UNIVERSO

Volvamos a los trabajos precursores de Hubble, que abrieron nuevos caminos al medir las distancias de las galaxias exteriores en los años veinte, para reconstruir la historia de la expansión del Universo desde el *Big Bang*. Hubble pronto se dio cuenta de que las galaxias están distribuidas uniformemente por el cielo (Universo isótropo) y que todas las galaxias, excepto las más cercanas a nosotros, presentan un desplazamiento hacia el rojo en su espectro (Universo que se expande). En 1929, anunció que la velocidad de recesión indicada por el desplazamiento hacia el rojo es proporcional a la distancia que hay entre la galaxia y nosotros: la famosa relación desplazamiento hacia el rojo/distancia, conocida hoy como ley de Hubble. Éste es exactamente el comportamiento necesario para encajar en los modelos de Fridman, basados en las ecuaciones de Einstein, y también la única clase de expansión universal que no requiere que la Tierra y nuestra Galaxia ocupen un lugar especial. Si imaginamos un globo que se expande, salpicado de manchas de pintura, *cada* mancha "verá" que todas las demás se alejan a una velocidad proporcional a su distancia, y ninguna mancha podrá identificarse como el centro de la expansión. La ley de Hubble demuestra que el Universo está hecho de la misma forma —no hay ningún "centro de expansión", sino que todo se separa de todo lo demás. Y eso encaja con la otra gran

propiedad general del Universo, que no es igual en todas direcciones (isótropo), pero parece igual desde cualquier lugar (homogéneo). Por tanto, sólo hay en realidad una diferencia con la antigua visión cosmológica, que causó a Olbers tantos quebraderos de cabeza: no se trata de un universo isótropo, homogéneo y estático, sino de un Universo isótropo, homogéneo y en expansión.

Hacia 1931, la observación demostró la validez de la ley de Hubble hasta los 30 Mpc y velocidades de recesión de más de 20.000 km por segundo, y desde entonces todas las nuevas observaciones han confirmado la validez de la visión del Universo de Einstein/Fridman.[5]

Así que, finalmente, después de seguir la historia a través de dos décadas cruciales, ya podemos resumir la visión cosmológica moderna del Universo. Nuestra Galaxia entera, con sus 100.000 millones de estrellas, se considera simplemente como una isla corriente de materia en la inmensidad del espacio-tiempo, el verdadero tejido estructural del Universo. Hay muchísimas más galaxias, algunas mayores que la nuestra y otras menores, esparcidas por todo el Universo hasta donde podemos ver, algunas a unas distancias de millones de parsecs, a juzgar por la relación desplazamiento hacia el rojo/distancia. Las galaxias tienden a agruparse en enjambres, desde unas pocas a

---

[5] Podemos preguntamos de qué forma fueron calculadas las distancias más allá del límite de las cefeidas para poder establecer la ley de Hubble. La primera conjetura suponía que todas las galaxias eran igualmente brillantes, y la distancia estimada dependía únicamente del brillo aparente Entonces Hubble intentó aventurar que la galaxia más brillante dentro de un grupo de galaxias era la que estaba en el límite del brillo posible, y, por consiguiente, los miembros más brillantes de cada grupo era lógico que tuvieran el mismo brillo intrínseco. Esto proporcionó una evidencia suficiente para confirmar la ley de Hubble, de modo que ahora, el desplazamiento hacia el rojo se acepta como la mejor forma de medir la distancia más allá de nuestra vecindad cósmica inmediata. Pero hay que recordar que todo esto tiene su inicio, al fin y al cabo, en los estudios de las variables cefeidas, y que cuando los astrónomos refinan la escala de distancias de las cefeidas, como todavía hacen ligeramente de vez en cuando, a medida que se realizan más y mejores observaciones, nuestras medidas de distancia de todos los objetos astronómicos, hasta las de las galaxias más distantes, tienen que revisarse de acuerdo con ello.

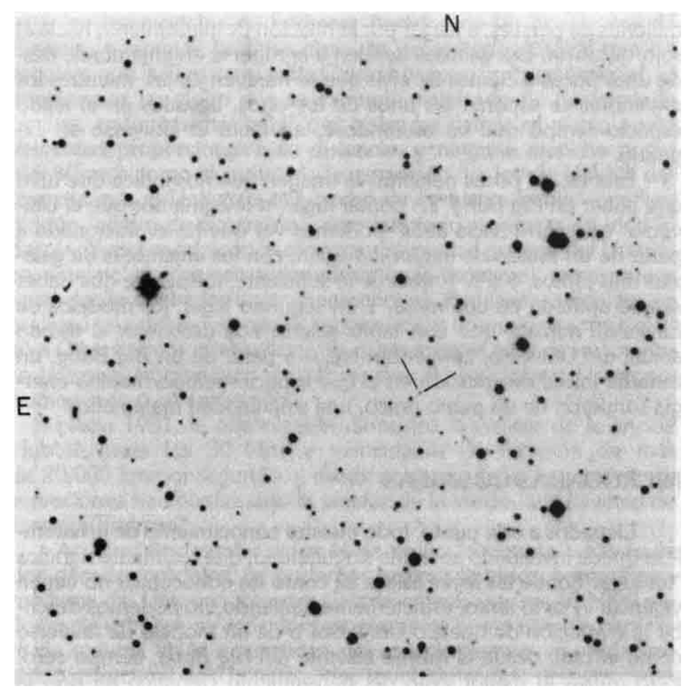
cientos de ellas que se mueven juntas, mientras los enjambres se separan los unos de los otros, llevados en el tejido espacio-tiempo que va estirándose, en tanto el Universo se expande.

Ésta es, en pocas palabras, la imagen que nos indica que tuvo que haber un *Big Bang*. En primer lugar, si imaginamos que el Universo "transcurre hacia atrás" podemos ver que ha evolucionado a partir de un estado de mayor densidad, con los enjambres de galaxias más juntos; y si se retrocede lo suficiente, todo tiene que haber estado apiñado en una masa. Y en segundo lugar, los modelos de Einstein/Fridman, que con tanto acierto nos describen el estado actual del Universo, comienzan todos a partir de un *Big Bang*, un instante inicial de creación en el que espacio-tiempo/materia-energía surgieron de un punto único, una singularidad matemática.

MICROONDAS COSMICAS

Llegados a este punto, todo nuestro conocimiento de la naturaleza queda invalidado ante una singularidad, que realmente significa "un lugar donde las leyes físicas tal como las conocemos no tienen vigencia". Por lo tanto, estrictamente hablando, no podemos describir la evolución de nuestro Universo, o de un modelo de universo como el real, desde el mismo instante del *Big Bang*, tiempo cero. Pero quizás el mayor éxito del pensamiento científico ha sido la consecución, entre los años sesenta y setenta, de una descripción intrínsecamente coherente de todo lo que ocurrió después de la primera cienmilésima de segundo hasta nuestros días, unos 15.000 millones de años más tarde. Este importante logro depende de dos factores extra, con los que la actual generación de científicos ha contribuido a sustentar los modelos básicos de Einstein y Fridman. En primer lugar, sabemos ahora que el *Big Bang* fue caliente; los modelos de Fridman incluyen universos que se iniciaron en frío, así como otras variables, y estos modelos pueden ahora eliminarse. En segundo lugar, los físicos de las altas energías que estudian la naturaleza y el comportamiento de las llamadas partículas

elementales (los bloques de construcción con los que están edificadas las partículas más “mundanas” como los protones y los neutrones), creen conocer la manera en que estas partículas se interaccionan en las más altas energías (altas temperaturas) y densidades (presiones) que debieron existir al principio de la historia de un universo con un *Big Bang* caliente.



El insignificante puntito borroso, señalado cerca del centro de la figura, que es una ampliación de una fotografía procedente del Palomar Sky Survey, es uno de los objetos más distantes descubiertos en el Universo, el quasar OH 471. El desplazamiento hacia el rojo determinado en 3,4 corresponde a una velocidad de recesión de más de un 90% de la velocidad de la luz. *(Fotografía cedida por R. F. Carswell.)*

Tendremos que tener fe en la física de las partículas; los estudios en sí son bastante esotéricos, y su aplicación al *Big*

Bang ha sido objeto de todo un libro[6]. Pero hay que hacer una pequeña digresión para explicar la historia de cómo sabemos que el Universo nació en llamas, en forma de un *Big Bang caliente.* Ya que la historia del descubrimiento y la interpretación de la llamada radiación cósmica de microondas de fondo es todo un clásico.

Amo Penzias y Robert Wilson serían los primeros en reconocer que su descubrimiento de las microondas cósmicas de fondo —el eco del *Big Bang*— lo deben en gran parte a un afortunado accidente. La medida de su suerte —y la importancia de su descubrimiento— se refleja en el hecho de que en 1978 compartieran el premio Nobel de física por su trabajo. El descubrimiento lo realizaron unos quince años antes, en 1964, cuando trabajaban en los Laboratorios Bell con una antena de radio muy sensible y un sistema receptor diseñado para comunicaciones que utilizaban las débiles señales reflejadas por los satélites *Eco.*

El sistema tenía que ser muy sensible, puesto que los satélites *Eco* no eran otra cosa que unos enormes globos, hinchados automáticamente en órbita terrestre y cubiertos con una película de material metálico para reflejar ondas de radio. Las señales lanzadas desde la Tierra rebotarían en los satélites, y una señal muy débil regresaría a la Tierra, donde sería detectada miles de millas lejos del transmisor. Siguiendo la política de la compañía Bell de estimular la investigación científica original, además de la investigación con objetivos claramente comerciales[7], Penzias y Wilson utilizaban la antena instalada en Holmdel, Nueva Jersey, para medir el "ruido" radio- eléctrico de fondo procedente de nuestra Vía Láctea, desde direcciones muy alejadas del centro de ella.

En términos comprensibles, estaban tratando de medir los ruidos radioeléctricos del espacio mismo, dado que en estas regiones alejadas del centro de nuestra Galaxia no podía haber

---

[6] Steven Weinberg, *Los primeros tres minutos*.

[7] Esto no es exactamente altruismo, sino que representa una gran publicidad para la Bell, como lo demuestra su mención aquí.

ondas de radio procedentes de estrellas individuales, sino de la difusa contribución de la interacción de átomos de hidrógeno del espacio con los campos magnéticos de la Galaxia. Este ruido que esperaban oír era tan débil que requería un sistema antena/receptor muy sensible para detectarlo. Además de una antena de veinte pies construida especialmente para la ocasión —antena que parecía una trompeta gigante—, utilizaban técnicas de sobrefusión en las que la potencia procedente de la antena era comparada con la señal producida por una fuente enfriada por helio líquido. Y finalmente descubrieron, en la primavera de 1964, una señal[8] mucho más fuerte que la esperada, que parecía proceder de todas las direcciones del cielo.

Esto era un verdadero rompecabezas. A medida que las semanas y los meses iban pasando, el equipo de Bell no encontró ningún cambio en la señal según las horas del día o las estaciones, lo que demostró que, dado que la Tierra gira y se mueve alrededor del Sol, y por consiguiente la antena apuntaba constantemente hacia diferentes partes de cielo, la señal tenía que ser genuinamente isótropa. Era tan fuerte, sin embargo, que si procedía del gas interestelar de nuestra Galaxia, ésta debía ser entonces un radiofaro en el Universo; pero otras galaxias como la nuestra (especialmente nuestra cercana vecina de la Andrómeda) no mostraban ninguna señal de tal emisión de radio en la longitud de onda de algo más de siete centímetros donde el ruido se detectaba.

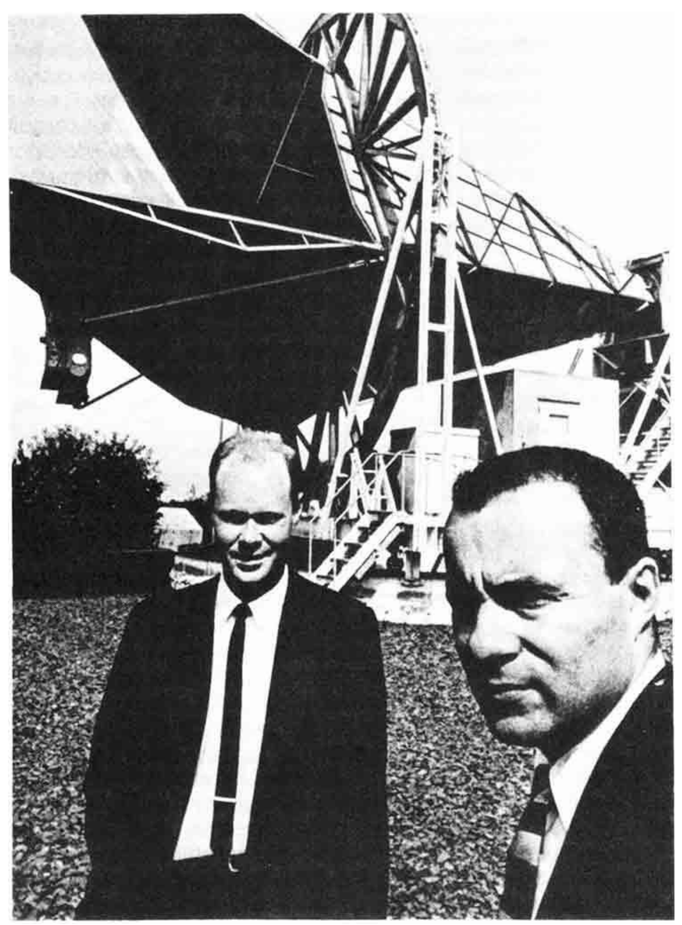
Parecía, de hecho, como si la señal —fuerte, comparada con lo que Penzias y Wilson esperaban, pero aún débil para los patrones convencionales— fuera un efecto secundario e inesperado del diseño de la antena. Quizás el ruido no provenía de ningún espacio más allá de la antena misma, una idea que parecía bastante lógica puesto que sabían que unas palomas habían adoptado su entrada como lugar de descanso y habían cu-

[8] "Señal", aquí, no significa un mensaje de los "hombrecillos verdes" del espacio. *Cualquier* ruido de radio, procedente de fuentes naturales o no. se denomina señal.

bierto generosamente el interior con sus excrementos, una sustancia con cuyas propiedades eléctricas no se contaba en el proyecto. Se ahuyentó a las palomas, y a principios de 1965 se desmontó la antena, se limpió a conciencia y se reconstruyó. No hubo ninguna diferencia; la señal cósmica seguía oyéndose, y seguía llegando de manera isótropa desde todas direcciones del espacio. Tenía que ser una verdadera señal de microondas cósmicas.

Esta señal tiene una propiedad muy importante. Todo en absoluto —incluso las deyecciones de las palomas— radia un ruido debido al movimiento de electrones del material. Cuanto más alta es la temperatura (por encima del cero absoluto, –273°C, temperatura a la que cesa todo movimiento térmico), más se mueven los electrones y más fuerte es el ruido radioeléctrico producido. Los físicos y los ingenieros de radio utilizan el concepto de una fuente ideal de ruido térmico de radio, un llamado cuerpo negro que radia perfectamente en todas las longitudes de onda (de ello resulta que también debe *absorber* perfectamente la radiación electromagnética en todas las longitudes de onda, y de ahí su nombre). La potencia de cualquier ruido radio puede compararse con la intensidad teórica de radiación de un cuerpo negro para dar una medida del equivalente de temperatura de la fuente que produce la radiación. Y el ruido radio descubierto por Penzias y Wilson —el campo de microondas cósmicas— era equivalente a la radiación de un cuerpo negro con una temperatura entre 2,5 y 4,5 grados por encima del cero absoluto (2,5°K a 4,5°K). Esta es, ciertamente, una señal débil. Pero si realmente llena *todo* el espacio (más exactamente, todo el espacio-tiempo), entonces se trata, en suma, de una gran cantidad de energía. ¿Cómo se produjo? ¿Qué significaba la señal? Las respuestas a estas preguntas aparecieron pronto, una vez la noticia del descubrimiento llegó a oídos de los astrofísicos, ya que en el mismo estado de Nueva Jersey, en la Universidad de Princeton, un equipo estaba construyendo una antena especial para probar la existencia de un campo de microondas cósmicas, como había predicho, sin que

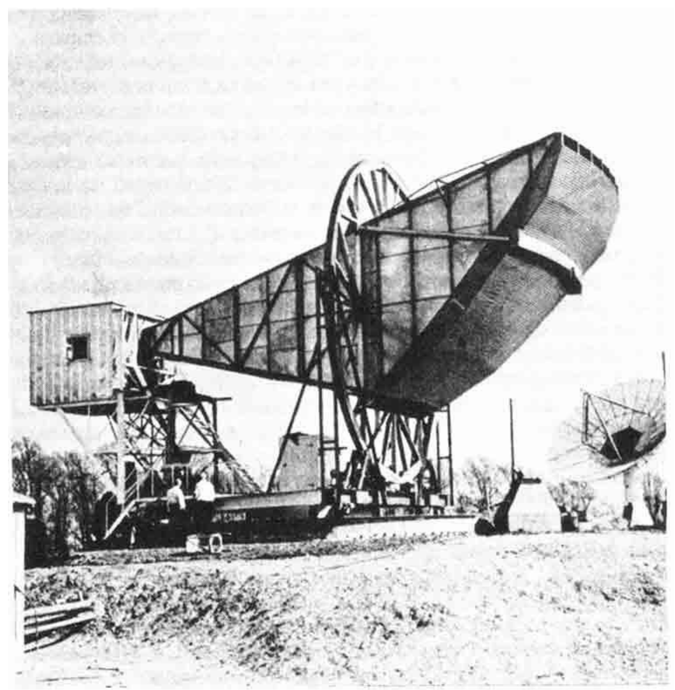
Penzias y Wilson lo supieran, el teórico de Princeton P. J. E. Peebles.



Amo Penzias y Robert Wilson. *(Fotografía de los Bell Labs*.)

Peebles había estado trabajando con un físico en Princeton, Robert Dicke, quien le había señalado que si el Universo ha evolucionado desde un estado más compacto y caliente, sería

posible detectar los restos de radiación de la fase caliente que todavía quedaba hoy en el espacio. Cuando Peebles hizo los cálculos pertinentes vio que, efectivamente, tenía que haber una gran cantidad de radiación, si el modelo del *Big Bang* era aplicable al Universo en que vivimos.



Antena en forma de trompa mediante la cual Penzias y Wilson descubrieron la radiación de fondo de microondas cósmica, que es el eco del propio *Big Bang*. (*Fotografía de los Bell Labs*.)

El punto crucial está en que la mayor parte de la materia que hay en el Universo es hidrógeno, el elemento más simple de todos; sin embargo, a densidades muy altas, equivalentes a la explosión del *Big Bang* a partir de una singularidad, las partículas básicas (protones, neutrones y electrones) estarían tan apiñadas que tenderían a convertirse rápidamente en elementos

mucho más pesados. La única manera de que no ocurriera esto era que el Universo estuviera lleno no sólo de materia, sino también de una radiación intensa (es decir, caliente), no sólo de ondas de radio o incluso de luz, sino de una radiación más potente que la de los rayos X y gamma, radiación con una enorme temperatura de cuerpo negro que desintegrara los núcleos de los elementos pesados tan rápidamente como se formaban, y que después se enfriara a medida que el Universo se expandía, dejando el hidrógeno y un poco de helio, que formaron las estrellas y las galaxias que hoy vemos.

El enfriamiento de la intensa radiación original es fundamental. Desde un punto de vista, ésta es justamente otra manifestación del desplazamiento hacia el rojo: la radiación de longitud de onda muy corta del *Big Bang* se extendió, se "estiró" para ocupar todo el Universo en expansión, y se extendió todavía más (debilitándose) a medida que pasaba el tiempo. Desde otro punto de vista, el cambio es de *densidad* energética, no de energía total. Imagínese una caja dividida exactamente por la mitad por un tabique, en una parte de la cual hay cierta cantidad de gas y en la otra el vacío. Si se elimina el tabique, el gas ocupará toda la caja, pero la cantidad de gas presente en cada centímetro cúbico será la mitad de la que había antes de reunir las dos partes. Lo mismo sucedería si una mitad de la caja estuviera llena de radiación, aunque el "experimento" en este caso no puede realizarse y sólo está en nuestra imaginación. Imaginemos nuestra caja (un cuerpo negro), cuya mitad está llena de radiación, y luego quitemos la separación. La radiación se extiende por toda la caja, y la densidad de energía disminuye. Esta disminución de la densidad de energía equivale exactamente a la disminución de la temperatura de radiación del cuerpo negro. Por lo tanto, por analogía, la expansión del Universo después del *Big Bang* "enfriaría" la radiación original. Y cuando Peebles hizo los primeros cálculos aproximados descubrió que, para explicar por qué sólo quedaba hidrógeno y helio tras el *Big Bang,* tenía que haber todavía un resto de radiación de fondo en el Universo actual, con una temperatura de unos 10°K. P. G. Roll y D. T. Wilkinson, que trabajaban en

Princeton bajo la dirección de Dicke, estaban construyendo un sistema para buscar ese fondo de radiación predicho por Peebles, cuando se enteraron del descubrimiento de Penzias y Wilson[9].

Finalmente, los dos equipos publicaron sus descubrimientos iniciales del campo cósmico en el mismo número del *Astrophysical Journal*, un trabajo firmado por Penzias y Wilson y el otro por Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson. Es difícil comprender por qué el equipo que predijo la presencia de radiación y explicó su origen no merezca más que unas notas a pie de página en los libros de historia, mientras que el equipo que encontró la radiación por casualidad y no supo explicar qué era, obtuviera el premio Nobel. Pero no hay duda de que el descubrimiento en sí merecía este reconocimiento.

Después de 1965, muchas observaciones en una amplia gama de longitudes de onda han confirmado la naturaleza de la radiación cósmica de fondo y han establecido su equivalente temperatura en 2,7°K, la más baja de las estimadas por Penzias y Wilson. Ahora, en los años ochenta, los astrofísicos intentan descubrir cualquier evidencia de las sutiles propiedades del Universo a partir de las pequeñas variaciones de radiación lejos de un espectro de cuerpo negro "perfecto", importante trabajo, pero mucho más sutil comparado con el significado literalmente cósmico de la mera existencia de la radiación de fondo. De esta manera, una vez tomada la temperatura actual del Uni-

---

[9] Las sutilidades y las ironías de la historia van realmente más lejos. A mediados los años cuarenta, algunas personas discutieron sobre las implicaciones de "un *Big Bang* caliente", y el mismo Dicke fue miembro de un grupo que incluso estimó que la temperatura de cualquier radiación estaba por debajo de los 20 K. Parece que se olvidó de todo ello cuando Peebles se puso en camino de su predicción, dos décadas más tarde. Durante este tiempo, otros realizaron cálculos parecidos, pero no llegaron a ninguna conclusión. Parece que los teóricos no creían realmente que sus sencillos cálculos pudieran aplicarse al Universo real. El descubrimiento hecho por Penzias y Wilson fue tan importante —demostrándoles a los teóricos que, efectivamente, estaban en realidad describiendo el Universo *real*— como sencillos los términos científicos empleados.

verso, podemos retroceder hasta el principio, elevando la temperatura de manera apropiada a medida que la “caja” del Universo se comprime y la densidad de la energía aumenta, y entonces empezar desde justo después del *Big Bang* hasta la actualidad. En cierto modo, todo lo explicado hasta ahora en este libro ha sido un preámbulo, una puesta en escena necesaria para explicar cómo podemos describir con tanta seguridad acontecimientos tan cercanos al propio comienzo del espacio-tiempo, como lo conocemos.

Después de haber convencido, espero, al lector de que los cosmólogos realmente saben de lo que hablan, es cuando la historia comienza *de verdad.*

EL *BIG BANG*

El principio de todo debería estar en la hora cero, cuando la densidad del Universo era infinita. Pero no podemos manejárnoslas con singularidades e infinitos, de modo que, aunque sospechemos que realmente hubo una singularidad en el comienzo del espacio- tiempo, empezaremos la descripción matemática del origen de nuestro Universo desde un momento en que la densidad de éste era enorme pero finita y su temperatura también era enorme pero igualmente finita. No podemos decir honestamente cómo nació el Universo, muy denso y muy caliente. Pero sí podemos decir, no obstante, cómo pasó de ser muy denso y muy caliente a ser casi vacío y muy frío, su estado actual. La moderna visión cosmológica del mundo empieza en el momento en que el Universo se ha enfriado a “sólo” un billón de grados (10^{12} °K), en la cienmilésima de segundo (10^{5} s) después del instante de la creación. Incluso bajo estas condiciones extremas, las leyes de la física deducidas aquí en la Tierra pueden aplicarse para establecer una historia intrínsecamente coherente de lo que ha pasado desde entonces.

A una temperatura de 10^{12} °K, las partículas y la radiación son intercambiables; la densidad de la energía de la radiación del cuerpo negro a esas temperaturas es tan grande que puede

literalmente producir pares de partículas como protones y electrones, y no a partir del aire tenue, sino de una densa radiación. El proceso sigue dos reglas clave, hoy muy conocidas por los físicos no sólo por la teoría sino por los experimentos que realizan en los aceleradores de partículas (ciclotrones, sincrotrones y otros). En primer lugar, la ecuación que tanta gente conoce y que se ha convertido en un cliché (incluso para aquellos que no saben qué significa): $E=mc^2$. Esta ecuación describe el descubrimiento de Einstein sobre la intercambiabilidad de la masa (m) y la energía (E), enlazado por un factor de conversión del cuadrado de la velocidad de la luz (c^2). Dado que la velocidad de la luz es tan elevada, 3×10^{10}, esto significa que la energía equivalente a un gramo de materia es absolutamente enorme; la energía equivalente de un pequeño protón, que pesa alrededor de $1{,}6\times10^{-24}$ gramos, es correspondientemente pequeña, y ésta es la razón por la cual pueden crearse protones individuales a partir de la energía de una radiación muy caliente, pero gramos enteros de materia no pueden producirse de esta manera. La energía de la radiación se describe mediante la otra ecuación, $E=hv$, donde v es la frecuencia de la radiación (el inverso de su longitud de onda, de modo que cuanto más corta sea la longitud de onda mayor es la frecuencia y más energética la radiación) y h es otra constante, la constante de Planck, unos $6{,}6\times10^{-27}$ ergios/segundo. Así, una temperatura más alta del cuerpo negro corresponde a una mayor v, que significa mayor energía E disponible para crear partículas de masa m. En otras palabras, cuanto más alta es la temperatura, mayores (con más masa) serán las partículas que puedan crearse.

Por tanto, una cienmilésima de segundo después del comienzo, el Universo era una agitada masa de partículas y radiaciones, un turbulento caldo donde se creaban sin cesar pares de partículas a partir de la radiación y constantemente se destruían y se reconvertían otra vez en radiación. Puesto que, de la manera en que el Universo está hecho —obedeciendo las leyes de la física que hemos deducido a través de la experimentación—

, un paquete energético de radiación (un fotón) no puede construir un solo electrón, o protón o lo que sea. La creación siempre produce un par: una partícula y su "antipartícula".

La antimateria es una forma de materia que tiene las propiedades casi inversas, como una imagen en un espejo, comparada con la materia que nos constituye a usted, a mí y a casi todo en el Universo. Tomemos una propiedad obvia, la carga eléctrica: la carga de un electrón es negativa, mientras su antipartícula, el positrón, tiene exactamente la misma cantidad de carga, pero no es negativa sino positiva. Cuando una partícula se encuentra con su antipartícula, el resultado es la aniquilación en una explosión de radiación, es decir, la masa se convierte totalmente en energía. De forma que al mismo tiempo que la energía de la radiación es convertida en pares de partículas, los pares de partículas eran convertidas de nuevo en radiación durante los primeros momentos de la existencia del Universo. En conjunto, sin embargo, la masa/energía total de todo el sistema —de todo el Universo— era constante. Para cada E/c^2 de masa creada o destruida, se creaba o destruía siempre un equivalente exacto de E/h de radiación.

Las cosas empezaron a ordenarse a medida que el Universo se expandía y la temperatura bajaba a 10^{11} °K, aun dentro de la primera décima de segundo (0,1 s) de vida del Universo. A esta temperatura, ya no podían crearse las exóticas partículas con grandes masas, y cualquier cosa rara que se hubiera creado, pronto encontró su antipartícula y se aniquiló. Sólo los pares electrón/positrón y los neutrino/antineutrino eran lo suficiente ligeros para tener una implicación continuada en el equilibrio materia/radiación. ¿Qué tamaño tenía entonces el Universo? Es natural hacerse esta pregunta, pero quizá no tenga mucho sentido. Si el Universo es abierto y capaz de expandirse eternamente, entonces es infinito en tamaño y *siempre lo ha sido.* En un Universo así, de extensión infinita, incluso inmediatamente después del *Big Bang,* cuando era muy caliente y muy denso, la temperatura y la densidad proporcionan los únicos indicadores sensibles de su evolución, dado que la expansión producía un Universo más frío y más tenue, pero igualmente infinito.

Por otro lado, si el Universo es cerrado y finito, la pregunta puede contestarse, aunque la respuesta será abstrusa. En este caso, la circunferencia del Universo ha aumentado desde cero, y es inversamente proporcional a la temperatura del cuerpo negro —la temperatura de la radiación de fondo— en todo momento. Después de 0,1 s, a 10^{11} °K, la circunferencia hubiera sido de alrededor de cuatro años luz, un parsec, en este modelo.

He aquí, en realidad, algo curioso. Está profundamente arraigado en el corazón de la teoría de la relatividad, teoría en base a la cual estos modelos de Universo están pensados, que la velocidad de la luz es una constante absoluta (en el vacío) y el "límite de velocidad" extremo. Empezar desde un volumen cero y producir algo de cuatro años luz a la redonda en sólo 0,1 s parece violar claramente este límite de velocidad. Pero lo cierto es que este límite afecta sólo a la materia que se mueve a través del espacio-tiempo, en tanto que la expansión del Universo implica un cambio evolutivo del propio espacio-tiempo. Recordemos que la materia no fluye a través del espacio-tiempo en la expansión, sino que es llevada "de viaje"; el desplazamiento hacia el rojo que vemos en la luz de las galaxias lejanas no indica que estas galaxias se alejen de nosotros a través del espacio, sino que el espacio-tiempo que hay entre ellas y nosotros se está extendiendo. En realidad, esas galaxias están inmóviles en relación con el espacio-tiempo de su lugar; y es efectivamente posible que haya galaxias tan alejadas de nosotros en el tejido espacio-tiempo que su luz no pueda llegamos jamás, puesto que el espacio-tiempo que nos separa de ellas se extiende con tanta rapidez que la luz no puede cruzarlo, dando la sensación, desde nuestro punto de vista, de que se alejan a una velocidad superior a la de la luz.

De cualquier forma, abierto o cerrado, el Universo es algo tan complicado que el "sentido común" no siempre es pertinente. Pero, sea como fuere, esta historia en continua evolución puede explicarse en términos de decreciente densidad y temperatura, no de "tamaño" (cualquiera que sea su significado). La cuestión de si es abierto o cerrado, no obstante, puede tener

importantes repercusiones en un lejano futuro, como ya veremos más adelante.

MATERIA RESIDUAL

Alrededor de unos 14 segundos después del *Big Bang*, la temperatura del Universo bajó hasta unos 3×10^9 °K, y la ya débil radiación dejó de tener la fuerza suficiente para crear pares de electrones y positrones. La mayor parte de los electrones entraron en contacto con sus respectivos oponentes y se aniquilaron; los grandes días del intercambio materia/energía se habían terminado, y el Universo pasó a ser mucho más tranquilo y mucho más vacío. Pero no vacío del todo. Ya que, por alguna razón que todavía no conocemos —y que quizá nunca conozcamos—, quedaron algunos electrones, junto con protones, por lo menos en nuestro rincón del Universo. Quedó suficiente materia para formar las estrellas, las galaxias y los planetas que nos rodean, prácticamente todo lo que es importante en el Universo desde nuestro punto de vista de la vida, tal como la conocemos. Si el equilibrio materia/energía hubiera sido totalmente simétrico, sin un exceso de materia ni de antimateria, todo se habría aniquilado, y habría quedado un Universo en expansión como el nuestro, lleno de radiación de fondo como el que tenemos, pero sin ninguna materia en absoluto. Es posible que la cantidad de materia en el Universo sea igual a la cantidad de antimateria, pero que las dos se hayan separado de alguna manera misteriosa. Quizás alguna de las galaxias que los astrónomos estudian a través de sus telescopios esté constituida por antimateria, con soles de antimateria, planetas de antimateria, e incluso seres de antimateria. O quizá alguna asimetría inescrutable justo después del *Big Bang* produjo un ligero excedente de materia que se convirtió en el Universo que conocemos. De cualquier manera, hay razones para creer que existe una profunda relación entre la existencia de vida y la forma en que nuestro Universo está construido, un tema sobre el cual volveré.

La materia *quedó* al desacoplarse definitivamente de la radiación de fondo, y a partir de entonces ambas seguirían caminos distintos. La radiación quedó sin nada con lo que jugar, de modo que simplemente se fue enfriando en tanto el Universo se expandía, hasta llegar al eco de 2,7°K de su anterior apogeo, que detectamos en la actualidad. Para la materia, la aventura tan sólo estaba empezando. Alrededor de los 10^9 °K, unas setenta veces la temperatura actual del centro del Sol, muchos protones y neutrones se fusionaron en núcleos de helio, y a medida que el enfriamiento iba avanzando, éstos se unieron con electrones para convertirse en átomos de helio estable. Al mismo tiempo, el enfriamiento permitió que los protones restantes se unieran con electrones y formaran átomos de hidrógeno. Hacia el final de los cuatro primeros minutos después del *Big Bang,* el 75% de la masa del Universo existía en forma de núcleos de hidrógeno, y el resto en forma de núcleos de helio; hizo falta que pasaran unos 700.000 años más de enfriamiento para llegar al momento en que los electrones quedaran unidos a los núcleos para formar átomos, a una temperatura de cerca de 5.000°K. En realidad, la radiación todavía era capaz, hasta ese momento, de interacciones con la materia, dado que los electrones y protones libres, al poseer una carga eléctrica, sí mantenían interacciones con la radiación, aunque ningún proceso de aniquilación/creación tuvo lugar después de los cuatro primeros minutos. Por lo pronto, cuando medimos la radiación de fondo actual y encontramos que, con un alto grado de precisión, es al mismo tiempo isótropa y homogénea, ello nos indica algo de cómo era el Universo 700.000 años después del *Big Bang,* cuando materia y radiación dejaron de experimentar interacciones. Podemos decir con seguridad que desde esa época el Universo fue isótropo y homogéneo; no podemos asegurar con certeza que no alcanzara este estado a partir de una fase anterior más complicada, pero todo nos hace pensar que es acertada la opinión de que el Universo ha sido isótropo y homogéneo —con la pequeña excepción de que una parte de materia quedó residualmente cuando los intercambios masa/energía terminaron— siempre desde el *Big Bang.*

Después de los primeros 700.000 años, por tanto, la historia del Universo es la historia de la materia: galaxias, estrellas, planetas y vida. La edad del Universo era entonces algo menos de una vigésima parte de su edad actual; la temperatura del cuerpo negro era equivalente a la temperatura actual en la superficie del Sol. Comparado con los cuatro primeros minutos, esto era sólo un débil aleteo de energía, con la historia de la creación virtualmente acabada. Visto desde aquí y ahora, ése fue el ígneo horno del cual nacimos.

II. EL ORIGEN DE NUESTRA GALAXIA

Después de su etapa de bola de fuego, el Universo empezó a tener el aspecto actual, con materia concentrada en masas incandescentes (estrellas), agrupadas en islas materiales (galaxias) y esparcidas por todo el espacio vacío. Pero la manera como se formaron las galaxias, y como evolucionaron después, dependió de su herencia de la bola de fuego.

Cuando miramos el cielo nocturno en una noche sin nubes (y lejos de las luces de las ciudades) vemos un impresionante despliegue de brillantes estrellas. El despliegue es realmente tan impresionante, que es sorprendente saber que a simple vista sólo pueden distinguirse unas 3.000 estrellas, incluso en la noche más oscura y sin luna. No importa el tiempo que estemos contemplando el cielo, nunca veremos más estrellas que estas, dado que el ojo humano se adapta con mucha rapidez al máximo de que es capaz. Pero una cámara fotográfica trabaja de una manera bastante diferente del ojo humano, y cuanto más tiempo está abierto el obturador, más luz recoge. De modo que una placa fotográfica de larga exposición, con la ayuda de una cámara astronómica, muestra más imágenes que otra de exposición corta, y cuanto más larga sea ésta más débiles serán los objetos fotografiados en la placa.

De manera que fue gracias a la astrofotografía, y no por las observaciones del ojo humano sin ayuda, como los astrónomos supieron de la gran cantidad de estrellas de brillo débil y de la también gran cantidad de “nebulosas”, muy diferentes de las estrellas y descubiertas también en las fotografías astronómicas. Esta evidencia sugiere que existen miles de millones de estrellas que constituyen una isla en el espacio de unos treinta kiloparsecs de diámetro (nuestra Galaxia). Por decirlo de algún modo, estos objetos son similares a nuestro Sol (aunque hay una gran variedad de tamaños y brillos estelares), y si los vemos con una luz tan débil es porque se encuentran, en cifras

redondas, a decenas de millones de veces más lejos que el Sol. Muchos de los objetos borrosos, según sabemos ahora, son galaxias enteras de estrellas situadas a miles de millones de veces más lejos aún, y sólo las podemos ver porque contienen cientos o miles de millones de estrellas. Las distancias entre las galaxias y nosotros —las de todas, a excepción de nuestras vecinas más próximas— son tan grandes que la luz de miles de millones de estrellas como el Sol aparece como una mancha débil y borrosa en el cielo, no más brillante en una placa fotográfica de larga exposición que la apagada imagen de una débil estrella.

En lo que concierne a la vida en la Tierra, estos glóbulos borrosos de las placas fotográficas podrían parecer de muy poca significación. Pero gracias al estudio de esas manchas borrosas Hubble y sus contemporáneos encontraron por primera vez evidencias convincentes de que el Universo se expande, con todo lo que ello implica para el *Big Bang* y el origen de todo. Y si queremos comprender nuestra propia Galaxia, y el lugar que ocupan el Sol y el Sistema Solar en el seno de la Galaxia, es de gran ayuda la observación de las galaxias en general, del mismo modo que es más fácil adquirir un conocimiento de la naturaleza de los árboles en general observando todo un bosque que estudiando un solo ejemplar.

ESTRELLAS BRILLANTES EN UN UNIVERSO OSCURO

La característica más sorprendente del Universo actual es que es un lugar oscuro que contiene grumos locales de material brillante. Ya he discutido las implicaciones de esto en términos de la paradoja de Olbers, pero también es sorprendente en otro sentido. Uno de los patrones fundamentales de comportamiento que encontramos en el mundo físico es la tendencia de las cosas a desgastarse y agotarse. Las cosas tienden, para usar un término especializado, hacia un estado de equilibrio termodinámico. Si depositamos un trozo de hielo en un recipiente con agua caliente, el hielo se deshace mientras el agua se enfría

y nos quedamos con un estado templado, intermedio. Si colocamos estrellas brillantes y calientes en un Universo frío y oscuro, el mismo patrón de comportamiento debería tener como resultado el que las estrellas entregaran su energía y calentaran (¡muy ligeramente!) el Universo, antes de que también se enfriaran y murieran, y se restableciera el equilibrio termodinámico. En tal estado, toda la materia que hay en el Universo estaría a una temperatura ligeramente por debajo de 3K, en equilibrio con la radiación cósmica de fondo (esto es darle la vuelta a la paradoja de Olbers; se puede argüir, con toda lógica, que para crear un equilibrio termodinámico la radiación de fondo podría estar tan caliente como una estrella brillante, de forma que el cielo fuera una llamarada de luz). La explicación más simple del desequilibrio termodinámico que vemos en el Universo que nos rodea es que el Universo está, efectivamente, bajando. El *Big Bang* produjo la ruptura de equilibrio equivalente a dejar caer un pedazo de hielo en un recipiente de agua caliente, y ahora vivimos en una época en que las cosas vuelven a su equilibrio normal, aunque todavía estemos muy lejos de él. Así las cosas, el reciente descubrimiento de que por lo menos el 90% de la materia del Universo se encuentra en forma de estrellas muertas y frías, es un descubrimiento feliz, porque demuestra que, con mucho, la mayor parte de la materia del Universo *está* en equilibrio con la fría radiación de fondo.

Las galaxias brillantes —esos objetos borrosos que hacen que las fotografías de las profundidades del espacio no sean completamente negras— no son más que el último parpadeo de desequilibrio mientras la materia continúa ajustándose después de la convulsión de la bola de fuego. Este importante conocimiento nos proporciona una nueva perspectiva. Hoy día, los radiotelescopios desempeñan un papel tan importante en el estudio de las galaxias como la astrofotografía, y las observaciones a través del espectro electromagnético en las longitudes de onda de los rayos X, del ultravioleta, etc., están adquiriendo cada vez una mayor importancia a medida que más y más instrumentos son lanzados al espacio en satélites que orbitan por

encima de las capas de la atmósfera terrestre, capas que dificultan la observación desde la Tierra.

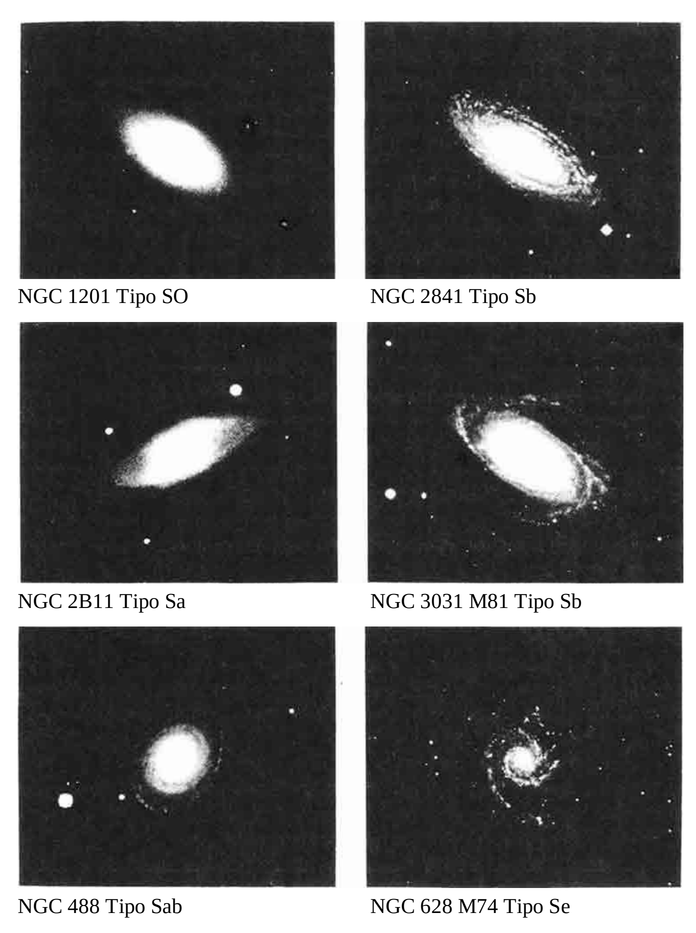
Hubble clasificó las diferentes clases de galaxias visibles en las fotografías astronómicas según sus formas, lo cual, por supuesto, era razonable, ya que eso era todo lo que se conocía en los años veinte. Su clasificación sigue hoy en uso, si bien con algunas modificaciones, y se basa en la distinción entre galaxias elípticas, que efectivamente tienen aspecto de elipses en las fotografías, y galaxias en espiral, que están formadas por un núcleo central de estrellas, como una galaxia elíptica en pequeño, y un disco circundante de estrellas y otros objetos, en el que se dibujan los brazos de la espiral. Las galaxias que no pueden incluirse en ninguna de las dos categorías se denominan irregulares, y las espirales se dividen en dos subcategorías: espirales corrientes, en las cuales la característica espiral va del núcleo central hacia fuera, y las espirales barradas, en las que la configuración espiral parece empezar en los extremos de una barra de estrellas que atraviesa el núcleo. Otras subdivisiones se refieren a si los brazos de la espiral están más juntos o no, o si las elípticas son más planas o más esféricas, etc. Pero estas diferencias no tienen una gran significación. Tampoco hay ningún significado real en una clasificación que se hizo mucho más tarde, que divide las galaxias en galaxias “normales” (que son tranquilas y se comportan bien) y galaxias “activas” (que parecen hacer explosión o estar implicadas en otras actividades violentas). Según parece ahora, todas las galaxias pasan por fases activas durante sus vidas, y por lo tanto es del todo normal que una galaxia sea activa.

En las décadas transcurridas desde la clasificación original de Hubble, muchos astrónomos le han añadido sutilezas, con subclasificaciones y sub-subclasificaciones. Ésta es la clase de atención por las menudencias de detalle que a veces llamamos coleccionar sellos astronómicos, añadir nuevas categorías porque sí. Y dado que los avances de los últimos años setenta han hecho posible explicar la variedad de galaxias que observamos en términos de los acontecimientos de la era posbola de fuego

e interacciones subsiguientes, no hay razón para tantas subdivisiones y categorías. El extremo importante que sí debe ser explicado por el nuevo modelo es que el 75% de las galaxias observadas sean espirales (incluida la nuestra), el 20% sean elípticas y el 5% restante sean irregulares. Además, puesto que parece haber muy pocas galaxias espirales en nuestra vecindad y sí, en cambio, muchas galaxias muy pequeñas elípticas e irregulares, estas observaciones probablemente no nos dan un buen esquema del balance del Universo, y las mejores conjeturas establecen este balance entre espirales y elípticas muy equilibrado, quizá con más elípticas que espirales si incluimos todas las pequeñas galaxias.

LA ESTRUCTURA DE LAS GALAXIAS

Ya basta sobre el aspecto de las galaxias. ¿Qué hay de su estructura, de qué están hechas y cómo se interrelacionan sus componentes? La propiedad más importante parece ser la de la rotación. Por su forma, las galaxias espirales en particular parece que son objetos de rotación muy rápida, con el disco y sus brazos espirales que giran alrededor del núcleo central. Esto se ha comprobado a través de la observación —aunque una galaxia como la nuestra puede tardar un par de cientos de millones de años en dar una vuelta completa, de modo que no hay posibilidad de verlo en el transcurso de una vida humana. Una vez más, como en el caso de la recesión de las galaxias, las observaciones dependen del desplazamiento de Doppler en la luz espectral producido por el movimiento. Como ejemplo sencillo, imagínese una galaxia espiral vista de canto que gira de manera que una parte del disco se mueve hacia nosotros mientras el otro lado, en la parte opuesta del núcleo, se aleja. Esta rotación se nos mostrará claramente como un desplazamiento hacia el azul por un lado del núcleo y como un desplazamiento hacia el rojo por el otro.



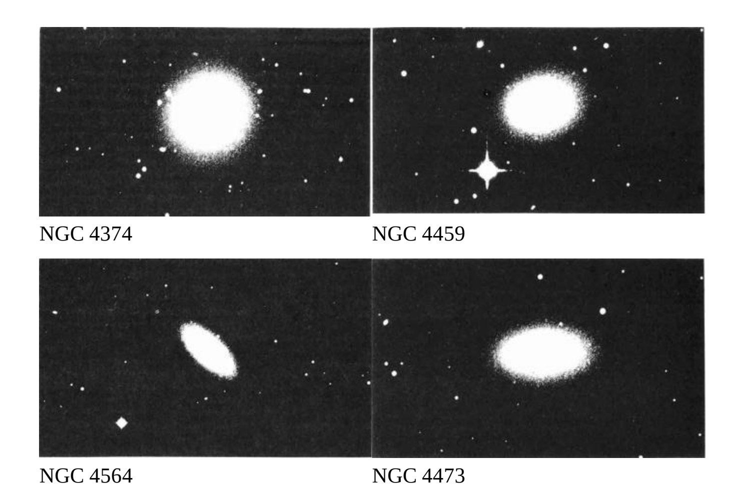
NGC 1201 Tipo SO
NGC 2841 Tipo Sb
NGC 2B11 Tipo Sa
NGC 3031 M81 Tipo Sb
NGC 488 Tipo Sab
NGC 628 M74 Tipo Se

En estas fotografías procedentes de los Hale Observatories puede observarse la variedad de galaxias espirales.

En el caso de muchas galaxias, la situación no es tan simple. En primer lugar, por supuesto, debe tenerse en cuenta el desplazamiento hacia el rojo de toda la galaxia, causado por la expansión del Universo. Y muy pocas galaxias están convenientemente situadas con respecto a nosotros. Pero los efectos de la

velocidad de rotación en diferentes partes de las galaxias pueden descifrarse incluso en casos no ideales, con la ayuda en parte de un efecto de la dilatación relativista del tiempo, que produce un desplazamiento hacia el rojo, que depende sólo de la velocidad, de la luz de una estrella que se mueve directamente *a través* del campo de visión. Todo ello demuestra que los discos de las galaxias espirales se mueven en realidad muy rápidamente —y si "rápidamente" parece una palabra exagerada para algo que tarda 200 millones de años en dar una vuelta, recuérdese que la rueda que gira tiene un diámetro de treinta parsecs, o cosa así. De hecho, las galaxias espirales giran casi tan rápidamente como es posible sin fragmentarse y dispersarse, y ésta es exactamente la clase de comportamiento que se produciría si las estrellas que vemos estuvieran constituidas por los materiales de una gran nube de gas, que se habría colapsado por su propia gravedad, pasando a un estado más compacto. El colapso habría creado un sistema poco equilibrado, en el que el tamaño de la galaxia producida dependería de la rotación de la nube inicial; a medida que el material se va colapsando, la nube gira más rápidamente, y la gravedad no puede hacer que el sistema adquiera un estado más compacto de lo que la rotación permite.

Las velocidades también pueden medirse en el caso de galaxias elípticas, que giran con mucha más lentitud. Esto, una vez más, es aproximadamente lo que los astrónomos esperan —si un efecto de la rotación es aplastar las cosas y convertirlas en discoidales, la conjetura indica que las galaxias elípticas, más redondas, no han experimentado un aplastamiento por la rotación. Pero ése no es el final de la historia, por cuanto que mediciones realizadas durante los años setenta, cuando se perfeccionaron las técnicas, revelaron que las galaxias elípticas giran con *mucha* más lentitud que la velocidad de dispersión correspondiente a su tamaño. Da la impresión de que se han formado de una manera muy diferente de las galaxias espirales, puesto que si también se han formado por el colapso de nubes de gas, ¿por qué el colapso se ha detenido mientras la gravedad aún dominaba sobre los efectos de la rotación?



Las galaxias elípticas muestran menor diversidad de formas que las espirales; simplemente varían desde la forma esférica, como la de la NGC 4374, a la de cigarro o huso, como la NGC 4564. Recientes observaciones, a partir de la medida del brillo visto en distintos puntos "a través" de las galaxias elípticas, han confirmado que esta disposición se debe, en realidad, a diferencias de forma y que una galaxia como la NGC 4374 es esférica, y no una galaxia ahusada mirada desde un extremo.
Montaje compuesto con fotografías tomadas con el telescopio Schmidt del Reino Unido y proporcionadas por el Royal Observatory de Edimburgo. Copyright 1980.

Estas nuevas evidencias estimularon a los astrónomos, hace un lustro, a meditar otra vez sobre la forma de las galaxias elípticas. Tenían más bien el *aspecto* de pelotas de fútbol americano, o forma de cigarro, y todos, desde Hubble en adelante, asumieron que las galaxias elípticas eran realmente así (elipsoides achatados en los polos). Pero era posible que hubiera un modelo de galaxias que parecieran elípticas en el espacio, pero que fueran en realidad discos inclinados respecto de nosotros de diferentes maneras (con formas de platillo y alargadas). Afortunadamente, con una sencilla prueba se puede distinguir entre los dos casos. Cuando contemplamos una galaxia circular en el cielo, tanto podemos estar viendo una galaxia en forma

de grueso cigarro por uno de sus extremos como una galaxia en forma de platillo de frente. En el primer caso, estaríamos viendo una larga columna de estrellas, de modo que las galaxias circulares deberían ser brillantes; en el otro caso, estaríamos viendo un delgado disco, y las galaxias circulares deberían aparecer con una luz relativamente débil. Y cuando los astrónomos comprobaron sus fotografías, se dieron cuenta de que, efectivamente, las galaxias elípticas que parecían circulares eran mucho más brillantes que las galaxias alargadas y delgadas. Las elípticas son realmente achatadas (como cigarros gruesos), y parece como si hubiera una diferencia fundamental entre su rotación y la rotación de las espirales, lo cual sugiere que hay dos formas diferentes de construir galaxias.

Hay otras diferencias entre las galaxias en espiral y las elípticas. Las elípticas contienen sobre todo estrellas rojas viejas, mientras que las espirales parecen tener dos tipos de "población". Las estrellas del disco —como las más cercanas al Sol, en nuestra Galaxia— son relativamente jóvenes, y la configuración en espiral se caracteriza invariablemente por la presencia de estrellas azules calientes; las estrellas del núcleo central, por otra parte, tienden a ser estrellas viejas y rojas, aproximadamente como las estrellas de una galaxia elíptica típica. En cierto modo, las espirales tienen el aspecto de elípticas, con brazos espirales de estrellas jóvenes a su alrededor, o las elípticas tienen aspecto de espirales despojadas de sus discos. Pero la idea de que una espiral puede "perder" su disco y evolucionar hasta convertirse en elíptica, es algo que no encaja con la evidencia de la rotación, ni tampoco da cuenta del hecho de que, si bien existen muchas pequeñas galaxias elípticas, las mayores galaxias de todas son invariablemente elípticas. Junto con las estrellas jóvenes del disco ("Población I"), las espirales también contienen una gran cantidad de material oscuro, nubes de gas de hidrógeno frío y polvo (principalmente de carbono), y una dispersión de moléculas de monóxido de carbono, agua y formaldehído. Las elípticas, con sus estrellas dominantes de la "Población II", parecen contener poco material interestelar, a excepción, quizá, de trazas de hidrógeno.



Nuestra propia Galaxia espiral, el sistema de la Vía Láctea, se nos mostraría más o menos de esta forma si pudiéramos observarla desde el exterior. El Sol se halla a unos dos tercios de distancia del centro de la Galaxia, cerca del borde de un brazo espiral. *(Fotografía de la galaxia Messier81, de los Hale Observatories.)*

El hidrógeno y los otros constituyentes del medio interestelar pueden estudiarse mejor en longitudes de onda de radio, y el hidrógeno en particular puede ser identificado por su lon-

gitud de onda característica de 21 cm. Las desviaciones de longitud de onda de esos 21 cm exactos se atribuyen a desplazamientos Doppler, que afectan a todo el espectro electromagnético, no sólo a la luz visible, de forma que la radioastronomía proporciona una poderosa herramienta adicional a la hora de elaborar el mapa de las curvas de rotación de las galaxias. También permite ampliar las observaciones de las galaxias más allá de las de estrellas brillantes, puesto que en muchos casos la emisión de hidrógeno puede detectarse en una extensión de espacio contiguo a las estrellas brillantes de la galaxia fotográfica. Aunque el hidrógeno en las galaxias en espiral suele seguir la configuración espiral, puede detectarse a una distancia dos veces más lejos del núcleo que cualquier estrella del disco. De modo que las técnicas de radio proporcionan la mejor imagen global de la curva de rotación en conjunto de una galaxia, de cómo la velocidad de rotación varía con la distancia desde el centro. Y esta evidencia, en la última mitad de los años setenta, confirmó el razonamiento de que las galaxias brillantes tenían que estar inmersas en unos halos oscuros más extensos y más masivos. En esencia, las curvas de rotación muestran los efectos de arrastre de material situado al exterior del disco brillante de una galaxia espiral, material que no brilla y que no puede observarse directamente, pero que establece interacciones con la galaxia brillante a través de la gravedad y hace sentir su presencia en la configuración de la curva de rotación. Este material oscuro no es gas frío, que emergerá a los 21 cm y que, en cualquier caso, pronto sería arrastrado hacia la galaxia central por gravedad. Podría ser algo exótico, como miles de millones de pequeñísimos agujeros negros esparcidos por el espacio. Pero puede explicarse, muy simplemente, como una masa de estrellas extinguidas, que quedó de la primera fase de formación de estrellas justo después de la bola de fuego. Esta es una de las grandes victorias de la astrofísica teórica moderna, un modelo que explica cómo se han formado las galaxias (en el cual los halos supermasivos desempeñan un papel decisivo) y cómo las galaxias elípticas han evolucionado a partir de las espirales, que aparecieron primero. Podemos ahora

retomar la historia desde la bola de fuego hasta la aparición de una galaxia como la nuestra, usando las últimas ideas aparecidas por primera vez en una revista científica[10], en 1978.

El problema es explicar cómo sucedió que unas estrellas calientes y brillantes se esparcieran por todo el frío y oscuro Universo, cuando, según la interpretación más moderna del *Big Bang* como origen del Universo, la propia bola de fuego era bastante uniforme. Resulta que todo depende de esa calificación de "muy cerca", ya que la exigua cantidad de materia brillante que hay actualmente en el Universo sólo constituye una minúscula desviación del equilibrio, establecido a partir de minúsculas fluctuaciones en el balance entre materia y radiación, al final del estadio de la bola de fuego. Hay que recordar, también, que la presencia de toda la materia es sólo el resultado de una minúscula desviación del equilibrio durante la bola de fuego; en un universo perfectamente uniforme toda la materia y antimateria se habrían aniquilado. Por tanto, hablamos ahora de los efectos de una minúscula variación dentro de lo que ya era, a escala cósmica, una minúscula variación. Las galaxias como la nuestra representan no sólo una idea tardía de la creación, sino una idea tardía de una idea tardía. Por eso es de lo más extraordinario que unas criaturas que habitan un pequeño rincón de una galaxia puedan producir una imagen (un modelo) intrínsecamente coherente y consistente de cómo sucedió todo.

FORMACIÓN DE LAS GALAXIAS

La historia de la formación de las galaxias empieza con las fluctuaciones del último período de la era de la bola de fuego, cuando el Universo estaba lleno de materia caliente y de radiación caliente. La materia era lo que podríamos llamar un gas ionizado, con electrones de cargas negativas y núcleos (principalmente protones) de cargas positivas, capaces aún de inter-

---

[10] La revista era la *Monthly Notices of the Royal Astronómical Society*. vol. 183; los autores del artículo eran S. D. M. White y M. J. Rees.

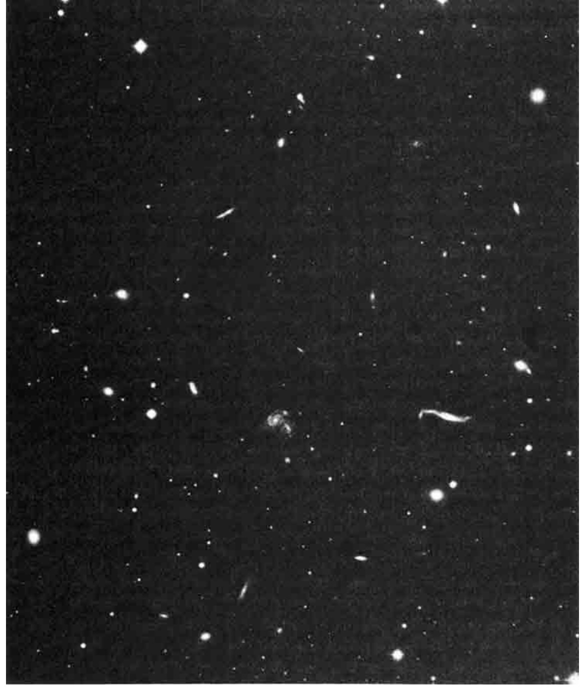
accionar con la radiación y no reunidos en átomos eléctricamente neutros. Las constantes interacciones entre las partículas cargadas y la radiación mantuvieron distribuidas de manera uniforme ambas formas de energía, y la uniformidad actual de la radiación cósmica de fondo, que apenas ha experimentado interacciones con la materia desde aquel tiempo, es una prueba de la uniformidad del Universo de entonces. Pero tuvo que haber algunas fluctuaciones en la perfecta uniformidad entre las partículas del gas ionizado. A medida que estas partículas se movían al azar, pudo haber ocurrido que, de vez en cuando, un lugar recibiera un cupo mayor de partículas del que le correspondía, con lo que aumentaba temporalmente su densidad, mientras que en alguna otra parte se producía un déficit de partículas, con lo que se aguaba el caldo cósmico. Y la radiación, bajo estas condiciones, estaba también sometida a la misma clase de fluctuaciones en la densidad de la energía. El Universo era ciertamente uniforme, en grandes tramos de espacio y razonables intervalos de tiempo. Pero debía bullir de actividad en la medida en que, primero en una parte y luego en otra, se formaban bolsas más o menos densas de masa o energía, sólo para ser disipadas por interacciones materia-radiación y reconvertidas en nuevas configuraciones. El modelo de galaxias brillantes que vemos hoy día es el producto de las últimas fluctuaciones de la bola de fuego, el modelo que se inmovilizó cuando el Universo se enfrió hasta el punto en que los núcleos exigieron su cuota de electrones para formar átomos eléctricamente neutros, y la radiación y la materia se desacoplaron, dejando a la gravedad como la fuerza universal dominante.

En una mezcla de gas ionizado y radiación, pueden tener lugar dos clases de fluctuaciones de densidad. Si sólo se trata de partículas que se juntan brevemente en un lugar de densidad aumentada, recibe el nombre de fluctuación “isotérmica” (porque no hay ningún cambio en la densidad de la energía, que corresponde a la temperatura); si la fluctuación hace que se incremente la densidad local tanto de materia como de radiación, se denomina “adiabática”. Ambas clases de fluctuaciones deben de haber ocurrido en la bola de fuego. Pero los modelos de

galaxias que hoy quedan muestran muy claramente que al final dominaron las fluctuaciones isotérmicas.

Más que intentar calcular la posterior evolución de un universo que presentaba ambas clases de fluctuaciones, los astrónomos han considerado por separado cada clase y sus consecuencias. Por razones puramente históricas —porque algunos de los primeros trabajos más significativos sobre este tema los realizó el académico Ya. B. Zel'dovich—, los teóricos soviéticos se han dedicado más al estudio de las fluctuaciones adiabáticas en un universo en expansión, mientras que los teóricos occidentales han considerado con más detalle las fluctuaciones isotérmicas.

La diferencia crucial entre las dos clases de fluctuaciones está en que mientras las isotérmicas (sólo materia) pueden ser de cualquier tamaño, las adiabáticas (materia más energía radiactiva) sólo pueden sobrevivir y crecer si empiezan con un tamaño mayor que el crítico. Las pequeñas fluctuaciones quedan rápidamente mitigadas y amortiguadas por los cambios en la densidad de energía de la radiación. Y lo que esta diferencia implica es que si las fluctuaciones isotérmicas son las que han dominado en la era de la recombinación, el Universo debería de estar lleno de muchas galaxias relativamente pequeñas, reunidas en grupos mayores, éstas a su vez en supergrupos y así sucesivamente, en una jerarquía continua. Pero si fueron las fluctuaciones adiabáticas las que dominaron en el Universo real, entonces las primeras agregaciones de materia debieron de ser muchas veces más masivas incluso que un cúmulo de galaxias tal como lo vemos en la actualidad. En este esquema, las agregaciones originales de materia habrían sido grandes nubes de gas, que después se habrían colapsado bajo la gravedad y se habrían fragmentado formando nubes más pequeñas, que a su vez se habrían fragmentado para formar galaxias y estrellas. Por lo tanto, las fluctuaciones adiabáticas no producen una jerarquía de cúmulos (como un juego de muñecas rusas), sino un modelo uniforme de supergrupos muy parecidos los unos a los otros (como una caja de soldaditos de juguete).



El modo en que las galaxias se encuentran acumuladas en el Universo proporciona indicios acerca de las condiciones reinantes en la bola de fuego de materia y radiación a partir de la que se formaron estrellas y galaxias. En la fotografía del cúmulo, tomada en dirección a la constelación de Hércules, cada mancha difusa representa una galaxia propiamente dicha, comparable a nuestra Vía Láctea. Justo debajo del centro de la fotografía se observa una interesante pareja de galaxias espirales interactivas; fuerzas de marea que participan en tales interacciones y colisiones frontales entre galaxias transforman algunas de las galaxias originalmente espirales de los cúmulos, en galaxias elípticas, desprovistas de brazos espirales. *(Fotografía de los Hale Observatories.)*

Analizar los modelos de agrupaciones o cúmulos de galaxias en el Universo real requiere mucha paciencia y una computadora buena y rápida para hacer los cálculos necesarios. Hasta ahora se han identificado más de un millón de galaxias

como miembros de un cúmulo u otro, y los cálculos estadísticos revelan un gran respaldo para el modelo isotérmico (jerárquico). Al mismo tiempo que se hacían estos cálculos a finales de los setenta, también se realizaban cálculos de la física de la era de la recombinación, sirviéndose de la cosmología avanzada de los setenta, que se había elaborado sobre el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo. Estas últimas estimaciones sugieren que, de hecho, cualquier fluctuación adiabática formada durante ese período sería muchísimo mayor que un supercúmulo de galaxias, y tan estable que hubiera permanecido para siempre en forma de grandes nubes de gas, y no se hubiera fragmentado jamás en galaxias tal y como las conocemos ahora. Por lo tanto, dos líneas de ataque apuntan ambas a la misma conclusión: la distribución de la materia en el Universo de hoy resulta de las fluctuaciones isotérmicas en su distribución (fluctuaciones de la densidad local) en la última fase de la bola de fuego cósmica, durante la recombinación.

Hasta aquí, todo es correcto. Pero, ¿cómo se formaron realmente unas galaxias como la nuestra a partir de las fluctuaciones primordiales? La historia completa está todavía por descubrir. Pero por lo menos las líneas maestras se están aclarando. Y el desarrollo del nuevo esquema implica un mayor progreso en los círculos astronómicos, donde una nueva oleada de descubrimientos nos está revelando que muchas de nuestras viejas ideas sobre las galaxias —y cuando digo "viejas" quiero decir anteriores a 1975— eran sencillamente erróneas. Al escribir en 1980, concretamente a principios de la década, se puede asegurar que ningún libro publicado antes, desde un texto académico hasta un libro de divulgación, proporciona una imagen veraz de lo que son las galaxias, y menos de cómo se formaron. Porque ninguno de esos libros va más allá de prestar una atención fugaz a la evidencia, deducida de los estudios sobre la curva de rotación, de que el 90% de la masa del Universo se encuentra en forma de estrellas oscuras, a las cuales, por analogía con las dos "poblaciones" de estrellas brillantes de las galaxias, se les da a veces el nombre de "Población III".

El modelo White-Rees, que es el primer intento coherente de elaborar un esquema completo de los nuevos conocimientos sobre las galaxias, se basa en el razonable argumento de que justo después de la recombinación, cuando la densidad total del Universo era mucho mayor que la actual, existían unas condiciones ideales para la formación de estrellas y que las primeras de ellas se formaron entonces en gran número. Estas estrellas fueron probablemente muy pequeñas, de un tamaño intermedio entre nuestro Sol y el gran planeta Júpiter, de forma que nunca destacaron demasiado por su energía nuclear y nunca fueron muy brillantes. O tal vez fueron muy grandes —superestrellas, quizá con la materia de un millón de soles— que quemaron su combustible nuclear muy deprisa, esparcieron las "cenizas" en forma de elementos más pesados formados a partir de hidrógeno y helio por fusión nuclear, y dejaron tras de sí pavesas extintas, estrellas de neutrones o agujeros negros. De un modo o de otro, las estrellas oscuras debieron de distribuirse entre la agrupación jerárquica, herencia de las fluctuaciones isotérmicas originales.

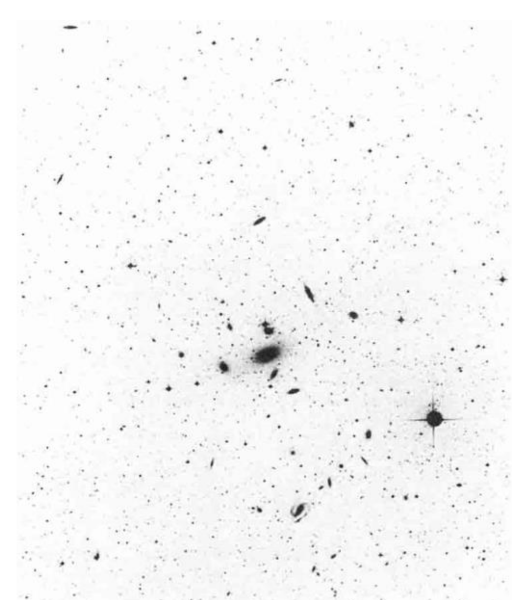
Sólo quedó un 10% del hidrógeno y helio originales enfriándose en el espacio entre esas primeras estrellas.

A medida que el Universo continuaba expandiéndose y separaba unos de otros a los cúmulos de las ahora estrellas muertas, el pequeño remanente de gas frío y viejo se sumió en el centro de las supergalaxias deslizándose dentro del pozo de potencial gravitatorio, y colapsó para formar las galaxias brillantes que vemos hoy, incrustadas profundamente en las galaxias reales de los restos de la Población III. Toda teoría nueva debe ser probada por confrontación con la observación, y la teoría White-Rees resiste la confrontación muy bien. En primer lugar, y muy importante, este modelo puede desarrollarse para explicar por qué hay dos clases de galaxias brillantes, espirales y elípticas, visibles en el Universo actual. (Las irregulares pueden explicarse mediante casi todas las teorías como los restos de otros procesos, ¡lo difícil es explicar las galaxias *estructurales*!)

Cuando se comprime cualquier nube de material, ésta tiene tendencia a girar con más rapidez, para conservar el momento angular. Lo mismo le ocurre a un patinador que gira sobre sí mismo y que aprieta los brazos contra el cuerpo; cuanto más compacto se hace un cuerpo en rotación (por grande que haya empezado) más rápidamente gira. De modo que el gas frío que habría caído en el centro de una galaxia de la Población III terminó por girar muy rápidamente, por lenta que fuera su rotación inicial. Cuando una tal nube en proceso de colapsar gira, experimenta un achatamiento; la gravedad puede seguir empujando la materia hacia los "polos", pero la rotación mantiene la materia alrededor del "ecuador" en contra de la fuerza de gravedad. De manera que algo muy parecido a una galaxia espiral surgiría de una nube así cuando alcanzara el tipo de densidad en la que puede iniciarse la formación de una estrella.

¿De dónde proceden las galaxias elípticas? Aquí es donde entran de nuevo en acción las computadoras, junto con más observaciones de la distribución de velocidad de las estrellas *dentro* de las galaxias elípticas típicas (utilizando una vez más la técnica de análisis de Doppler). Las simulaciones de computadora muestran que cuando dos galaxias espirales se encuentran (como debe suceder de vez en cuando al moverse por el cúmulo; la expansión del Universo aleja cada vez más los cúmulos unos de otros, pero esto no afecta a los movimientos de las galaxias dentro de su cúmulo, que se mantienen unidas por la gravedad, incluyendo la gravedad de las estrellas oscuras de la Población III), las interacciones gravitatorias (mareas) ocasionan grandes cambios en ellas. Los discos exteriores son los más afectados, e incluso encuentros muy próximos entre galaxias pueden desgarrarlos, sembrando estrellas a través de una extensión de espacio varias veces mayor que el diámetro de una galaxia brillante. Estos sistemas de interacción parece que pueden explicar ahora la variedad de galaxias de aspectos muy peculiares que han sido descubiertas aquí y allá en las fotografías astronómicas; y este logro representa un triunfal producto de la combinación entre la habilidad humana para plantear problemas y las computadoras; es necesario simular *dos* galaxias en

la computadora y después simular sus interacciones gravitatorias cuando pasan una junto a otra, mientras la propia computadora dibuja esquemas de las distribuciones cambiantes de las estrellas en las galaxias que interaccionan a medida que el encuentro se produce.



Otro cúmulo rico en galaxias, reproducido en negativo (negro sobre blanco) para mostrar los detalles con mayor claridad. Las manchas difusas son galaxias del cúmulo que se halla en la dirección de la constelación del Pavo; los puntos redondos son estrellas del primer plano de nuestra Galaxia, y las "puntas" que sobresalen son un efecto de la cámara fotográfica, por lo que no deben ser tenidas en cuenta. Esta fotografía fue tomada con el telescopio Schmidt del Reino Unido *(Royal Observatory*, Edimburgo), que puede verse al principio de este libro.

Pero ésta no es la única manera en que las galaxias se interaccionan. Puede haber también colisiones frontales, que despedazan las galaxias y cuyos fragmentos se convierten quizás en galaxias irregulares, como puede haber también fusiones más suaves entre galaxias espirales, que también desorganizan los

sistemas discoidales, pero dejan tras de sí un tipo de sistema diferente, una galaxia elíptica. Estos problemas todavía más intrincados están empezando a ser abordados por las computadoras, pero hay indicios reveladores de que las galaxias elípticas realmente pueden crearse de esta manera, por la fusión de las galaxias espirales. En sistemas tan agrupados como se observan hoy las galaxias, las simulaciones de la computadora muestran que por lo menos un 20% de las galaxias originales se fusionarán y se convertirán en elípticas o se deformarán a causa de los efectos gravitatorios de los encuentros. Las espirales no sólo "pierden" sus discos para convertirse en elípticas, sino que se transforman al fusionarse, lo cual cambia por completo la estructura de la galaxia resultante. En vez de que todas las estrellas de una elíptica circulen por el mismo camino alrededor del núcleo central (como las estrellas de una galaxia espiral), habría dos o más familias de estrellas en interacción, cada una de las cuales sigue una órbita que depende de la galaxia de la cual procede y de la naturaleza de la colisión de fusión. Y esto es exactamente lo que las observaciones muestran; la evidencia de Doppler indica que las elípticas no giran como simples nubes de gas, sino que contienen estrellas que siguen órbitas muy elípticas, aderezadas con las velocidades de las galaxias fusionadas. En palabras de los especialistas, la distribución de la velocidad de las estrellas en las galaxias elípticas es altamente anisótropa.

Por tanto, no es de extrañar que los intentos de explicar la naturaleza de las galaxias elípticas utilizando "modelos" basados en el colapso de nubes de gas, no funcionen; las elípticas simplemente no se formaron por el colapso de nubes de gas. La clarificación que resulta del nuevo modelo resuelve una gran cantidad de viejos problemas, y también significa que muchas de las interesantes ideas que antes se habían expuesto en un intento para resolver esos problemas ya no son válidas. Una medida para ver los problemas que comportaban muchas de estas ideas está en el hecho de que algunas de ellas ni siquiera fueron utilizadas; mi idea favorita durante mucho tiempo im-

plicaba que podían existir “agujeros blancos”, fuentes cósmicas de materia imaginadas como lo contrario de los agujeros negros, en el centro de las galaxias, vomitando materia que se convertía en estrellas, planetas, etc. Pero, para los románticos como yo, no hay necesidad de invocar tan exóticas ideas cuando los efectos de la marea gravitatoria de la fusión y de las fluctuaciones isotérmicas pueden considerarse ahora adecuadas para hacer la tarea. Todavía creo que los agujeros blancos pueden desempeñar un papel en la historia del Universo, quizás unidos a los agujeros negros a través de una especie de “metro cósmico” de agujeros de gusano del espacio-tiempo[11]. Pero ya no es necesario ni razonable invocarlos como la fuerza motriz de las galaxias. Puede parecer sorprendente que todas esas estrellas de la Población III —el 90% o más de la materia del Universo— hayan dejado un rastro visible tan pequeño en el Universo. Pero hace mucho tiempo de su apogeo —más del 90% de la historia del Universo ha tenido lugar después de la era de la recombinación— y tal vez hayan dejado, después de todo, una débil identificación tras de sí.

La excitación del descubrimiento de la de radiación de fondo cósmica del cuerpo negro en los años sesenta dio lugar, en los setenta, a otras técnicas más sofisticadas para medir el espectro exacto de la radiación y determinar, en particular, la magnitud de las pequeñas desviaciones con respecto a un espectro del cuerpo negro “perfecto”. Una de las más significativas desviaciones es una señal detectable (una cresta de eco) en las mediciones en unas longitudes de onda de unos pocos milímetros o menos. Y, a finales de 1979, Michael Rowan-Robinson, del Queen Mary College de Londres, y unos colegas que trabajaban en el *campus* de Berkeley de la Universidad de California, indicaron que esta señal podía ser una consecuencia directa de la primera fase de la formación de las estrellas —la marca de identificación de la Población III.

La señal se produce en el lugar justo para ser el rastro de la radiación emitida por granos de polvo caliente de silicato en el

[11] Ver mi libro *Timewarps* (Nueva York; Delacorte, 1979).

espacio, después de la era de la bola de fuego, pero en un momento todavía temprano en la historia del Universo. Sólo hay una manera en que esos silicatos pueden haberse formado tan tempranamente, y es en el caso de que las estrellas se hubieran formado todavía antes, quemaran su combustible nuclear y crearan elementos pesados, expulsando al menos una parte del material al espacio. Todo encaja en el esquema de la Población III, con una bonificación adicional para aquellos que, como yo mismo, prefieren la idea de un Universo "cerrado", antes que la de uno en expansión infinita y eterna. Tal como Rowan-Robinson y sus colegas establecieron, «la energía necesaria para deformar tan drásticamente el espectro es sustancial, y requiere la mayor parte de la materia de un Universo con densidad de cierre para sostener las reacciones termonucleares en la Población III»[12].

En otras palabras, a menos que haya suficiente materia en el Universo como para hacerlo cerrado más que abierto, es difícil de comprender cómo pudo producirse suficiente silicato a través de los procesos de la Población III para causar la señal que se observa en el espectro cósmico de fondo. Ésta es una conclusión muy dramática para ser deducida de las sutiles formas en que el débil silbido del campo de fondo de radiación, sólo detectado totalmente hace una década y media, se desvía formando una perfecta curva de cuerpo negro, e indica la manera en que los sutiles efectos de segundo orden de esa clase pueden usarse para proporcionar una información sobre el Universo tan valiosa como las proporcionadas mediante la observación. Parece como si discerniéramos de dónde proceden las galaxias como la nuestra, y la clase de Universo en el que se formaron y vivieron. La historia de cómo nació una estrella como nuestro Sol, junto con una familia de planetas, y pasa su vida en una galaxia como nuestra propia Vía Láctea puede escribirse, por primera vez, sobre este fondo de una historia consistente y auto-contenida de cómo el Universo entero ha llegado a ser como es ahora desde los tiempos del *Big Bang* de la

[12] En su artículo en *Nature*, en 1979.

creación. Pero nuestra galaxia no es sólo un resto del antiguo esplendor del superhalo de la Población III; es también un remanso relativamente tranquilo del Universo de hoy, comparado con los violentos procesos que todavía tienen lugar en algunas galaxias, y en los objetos conocidos por quasars. Así que, antes de descender al problema doméstico de ver de dónde proviene nuestro propio Sistema Solar, éste puede ser el lugar apropiado para hacer una pausa y desviamos un poco para echar una ojeada a las feroces bestias que se esconden en el corazón de muchas galaxias. Y, después de todo, quizá no es desviarse, puesto que es posible que una bestia similar, ahora dormida o en hibernación, se esconda también en el seno de nuestra Vía Láctea.

VIOLENCIA EN EL UNIVERSO

La actividad de algunas galaxias muestra que, si bien el Universo es hoy un lugar tranquilo comparado con lo que era durante los primeros mil millones de años después del *Big Bang,* aún es capaz de enormes estallidos energéticos. Algunas galaxias activas presentan un aspecto peculiar en las fotografías ópticas; otras se detectan por su fuerte emisión de radio. Muchas galaxias activas son peculiares por su longitud de onda tanto óptica como de radio. La historia del estudio de las galaxias peculiares data sólo de 1943, cuando Carl Seyfert publicó detalles sobre seis galaxias que constituyen los arquetipos de una clase llamadas ahora Seyferts en su honor. Todas esas galaxias son espirales, con unos centros pequeños pero muy brillantes; alrededor del 1% de todas las espirales se cree ahora que son del tipo Seyfert, que significa lo mismo que decir que *todas* las galaxias espirales pasan alrededor del 1% de su existencia en un estado activo del tipo del comportamiento Seyfert, y no que una de cada cien sea inusual en particular.

Durante los últimos cuarenta años, se han descubierto muchas otras clases de galaxias activas, incluyendo las galaxias N. que tienen un núcleo todavía más brillante que las de Seyfert, aunque por lo demás son muy parecidas, y los quasars,

que tienen un núcleo tan energético que eclipsa por completo el resto de la galaxia, y dan la apariencia de una sola estrella muy brillante, pero a la distancia de una galaxia. Durante algún tiempo después del descubrimiento de los quasars, a principios de los años sesenta, hubo una fuerte polémica en torno a si, en su caso, los desplazamientos hacia el rojo, que los situaban a distancias galácticas, podían considerarse simples indicadores de la ley de Hubble, o si eran un caso especial, y estaban situados muy cerca y presentaban un gran desplazamiento hacia el rojo por razones que no tenían relación con la expansión del Universo. Pero posteriores observaciones durante las dos décadas siguientes demostraron que los quasars están realmente incrustados en el corazón de las galaxias, y pocos astrónomos dudan ahora de la correcta interpretación en el sentido de la ley de Hubble de sus desplazamientos hacia el rojo. Eso convierte a algunos de ellos en los objetos más distantes que se conocen, unos pocos con velocidades de recesión superiores al 90% de la velocidad de la luz. La opinión generalmente aceptada hoy es la de que las galaxias de Seyfert, las N y los quasars forman una continua progresión en términos de estallidos energéticos de los núcleos de las galaxias, y que otros objetos peculiares extragalácticos encajan también en este esquema[13].

Todos estos objetos se clasifican según su aspecto óptico, y sus particularidades se revelan principalmente por la concentración de luminosidad (que significa una región concentrada de emisión de energía) en el centro de las galaxias. Las observaciones de radio, por otro lado, nos muestran que algunas galaxias energéticas y quasars extienden su influencia sobre grandes zonas del espacio. Una radiofuente típica tendrá dos “lóbulos” de potente radioemisión, que se extienden uno a cada lado de la galaxia a la que pertenece. La estructura es casi con toda

[13] Por ejemplo, hay una clase de objetos parecidos a los quasars llamados *BL Lacaertae*, que en un principio se consideraba que eran una nueva clase de galaxia energética, pero que a medida que se realizan más observaciones adquieren cada vez más el aspecto de primos hermanos de los quasars.

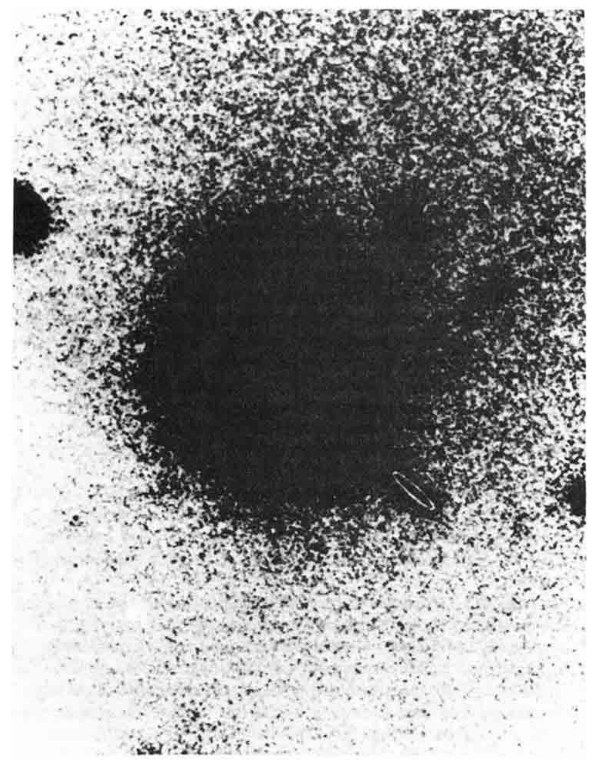
seguridad el resultado de partículas energéticas que salen despedidas en dos direcciones opuestas desde una fuente compacta central y que interaccionan con el tenue gas del espacio intergaláctico. La estructura radio puede extenderse sobre varios millones de años luz, y es "energizada" por una compacta región de menos de un día luz de diámetro. Y esto, junto con la rápida variabilidad de alguna de esas fuentes, sugiere que su energía procede de masivos agujeros negros centrales. Al mismo tiempo, también sugiere que *todas* las galaxias puede que tengan agujeros negros en sus centros, puesto que las diferencias entre los tipos de galaxias activas parecen ser diferentes de grado, no de clase.

Para tener idea de la energía de los quasars, tomemos como ejemplo la fuente conocida como AO 0235+164, que apareció de repente, tanto en la longitud de onda óptica como en la de radio, en otoño de 1975. Al cabo de unas pocas semanas, la potencia de ese quasar se incrementó en más de 10^{41} vatios, equivalente a 10.000 veces la potencia total de nuestra galaxia en todas las longitudes de onda. ¿De dónde pudo salir toda esa energía?

En una hipotética conversión completa de la materia en energía (a través de la interacción materia/antimateria), la conversión sería mc^2. Pero en el Universo real, desde la era de la bola de fuego, la energía sólo ha sido obtenible a partir de procesos de conversión menos eficientes[14], de forma que la masa equivalente a la energía liberada en una explosión de esa clase debe ser sólo una pequeña fracción del total de la masa presente en el corazón del quasar. La masa implicada alcanza unas magnitudes de millones de veces la masa del Sol; pero el lugar en el que ocurre la actividad abarca un diámetro no mayor, en cifras redondas, que el diámetro de nuestro propio Sistema Solar. La concentración de tanta materia en tan poco espacio sólo puede ocurrir en forma de agujero negro.

[14] Y, por supuesto, dado que el AO 0235+164 está todavía ahí, sabemos que no fue convertido en pura energía en la explosión.

El concepto de agujero negro se ha filtrado en el conocimiento general y es uno de los pocos chistes científicos (junto con la ecuación $E = mc^2$ y algún otro) que aparecen usualmente en el repertorio de los caricaturistas de los periódicos. Por desgracia, los mitos populares no siempre constituyen una fuente fiable de información científica, de forma que quizá sea mejor que deje claro lo que es un agujero negro.



El quasar 3C 273, en imagen negativa. El punto negro del centro señala la región de máxima intensidad de la radioemisión, y la elipse blanca delinea un chorro de material lanzado hacia fuera desde el centro y que origina una emisión secundaria de ondas de radio. Casi con toda seguridad, este tipo de actividad intensa está asociado con un agujero negro situado en el seno del quasar. *(Fotografía de los Hale Observatories*.)

AGUJEROS NEGROS Y QUASARS

En pocas palabras, un agujero negro se forma cuando una cantidad suficiente de materia se concentra en un reducido volumen de manera que la fuerza de atracción hacia el centro que ejerce la gravedad resulta lo suficientemente fuerte para superar cualquier resistencia y la materia se colapsa, y adquiere un estado tan denso y con un campo gravitatorio tan fuerte que ni siquiera la luz puede escapar de él. Cualquier acumulación de materia —incluida la Tierra— tiene un campo gravitatorio en su superficie cuya fuerza depende tanto de la masa como del radio del objeto. Para escapar de un planeta como la Tierra, un cohete, o cualquier otro proyectil, debe estar dotado de la suficiente energía para superar esta atracción gravitatoria. Un objeto que se lance con una velocidad menor que la "velocidad de escape" crítica volverá a caer en la Tierra, pero si se lanza con una velocidad superior a la de escape podrá salir al espacio. Para la Tierra, la velocidad de escape es de 11,2 km por segundo; para la Luna es de 2,4 km por segundo. La velocidad de escape de la superficie es mayor si la masa de la materia interior es mayor, de manera que sería más difícil escapar de un planeta como la Tierra, en tamaño y forma, pero el doble de masa. Pero dado que los planetas gigantes, como Júpiter, no sólo tienen más masa que la Tierra, sino que también tienen mayor tamaño, la velocidad de escape desde las capas exteriores de sus atmósferas quizá no sea mayor que desde la Tierra. Ambos factores, tamaño y masa, deben equilibrarse el uno con el otro para determinar la velocidad de escape, de modo que incluso en el caso de nuestro Sol la velocidad de escape de la superficie es de sólo 617,7 km por segundo, mientras que para Júpiter es de 61 km por segundo.

La Tierra está protegida de la atracción de la gravedad hacia el centro por las fuerzas eléctricas entre los átomos, que impiden que se fusionen unos con otros. Dentro del Sol, donde los electrones han sido arrancados de los núcleos atómicos, el calor de los procesos de fusión que tienen lugar en su interior mantiene los núcleos en movimiento, como los átomos en un gas

caliente, lo cual produce una presión hacia fuera, que contrarresta la atracción que la gravedad ejerce hacia el centro e impide el colapso del Sol. Y cuando terminen los procesos de fusión nuclear el Sol también se colapsará y pasará a un estado quieto y compacto en el que la gravedad es contrarrestada por las fuerzas eléctricas que mantienen a los átomos. Pero en el caso de una estrella con una masa sólo dos o tres veces la del Sol, una vez el centro se enfría y desaparece la presión hacia fuera, la gravedad dominará por completo. Los átomos son literalmente aplastados por la irresistible fuerza hacia el interior, y el colapso continúa indefinidamente. Al tiempo que esto ocurre, la densidad se incrementa y el radio de la estrella se encoge, lo que hace aumentar enormemente la velocidad de escape. No hay ya ninguna "superficie" que pueda servir de referencia, excepto el radio límite en el cual la velocidad de escape de la estrella que se contrae sobrepasa la velocidad de la luz. Una vez el objeto se ha colapsado en el seno de este radio, es imposible obtener alguna información del interior, dado que la propia luz queda atrapada por el intenso campo gravitacional. Para todo efecto práctico, la estrella ha desaparecido, y la esfera circundante, donde la velocidad de escape es la velocidad de la luz, constituye la superficie de un agujero negro.

Por lo tanto, una manera de hacer un agujero negro es poner una masa de materia equivalente a varios soles en un lugar, esperar que las reacciones de fusión nuclear sigan su curso y ver cómo se colapsa[15]. También es posible imaginar la creación de un agujero negro de otra manera. Dado que la velocidad de escape en la superficie de un objeto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del centro, pero directamente proporcional a la de la masa, que, a su vez, depende del volumen y es proporcional al cubo del radio, el resultado neto es que si se añade más masa con la *misma* densidad a un volumen en aumento, la velocidad de escape en la superficie aumenta. De modo que si imaginamos un cúmulo de estrellas como el Sol

[15] Esto, no obstante, tarda mucho tiempo en ocurrir (varios miles de millones de años).

amontonadas unas junto a otras en el espacio, la velocidad de escape desde la superficie del cúmulo será mayor que la velocidad de escape desde la superficie del Sol. En el caso de un cúmulo suficientemente grande, la velocidad de escape será mayor que la velocidad de la luz, con lo que se convertirá en un agujero negro del cual nada podrá escapar. Esto es muy curioso, puesto que cabe por completo la posibilidad de que una galaxia entera fuera lo suficiente compacta (es decir, lo suficiente densa) para que esto ocurriera, sin que las condiciones dentro de ella fueran muy diferentes a las que vemos alrededor nuestro en nuestra Galaxia: podrían formarse estrellas, con planetas y vida en ellos, y todo en un agujero negro de baja densidad y gran radio. En realidad, ésta es una manera de considerar el propio Universo, si se expande a una velocidad inferior a la velocidad crítica necesaria para que sea "cerrado". Un Universo así es, en realidad, un agujero negro autosuficiente. Pero éstos son unos objetos muy diferentes de las bestias que residen en los centros de las galaxias.

Esas bestias deben ser en realidad la variedad superdensa de agujero negro, con materia comprimida hasta la no existencia al otro lado de la barrera de la superficie en la cual la velocidad de escape supera la velocidad de la luz, el "horizonte" del agujero negro. No está claro lo que le sucede a la materia al otro lado del horizonte; quizá desaparezca de nuestro Universo. (Quizás incluso reaparezca como un "agujero blanco" en algún otro universo.) Pero lo que importa, en términos de la actividad en los centros de las galaxias, es cómo se comporta un agujero negro y qué aspecto tiene desde fuera. En pocas palabras, es el sumo pozo sin fondo, que se traga toda materia que cae en sus garras gravitatorias y que se hace cada vez más masivo, con un campo gravitatorio cada vez más fuerte, a medida que esto sucede. Cuando la materia es desgarrada y aspirada hacia el agujero, sus partículas entran en un estado de constante colisión entre sí, en un turbulento torbellino de material, que trata de penetrar como por un embudo en un pequeño volumen de espacio. Y con todo este forcejeo, las partículas se calientan e irradian energía en el espectro electromagnético. Bajo las

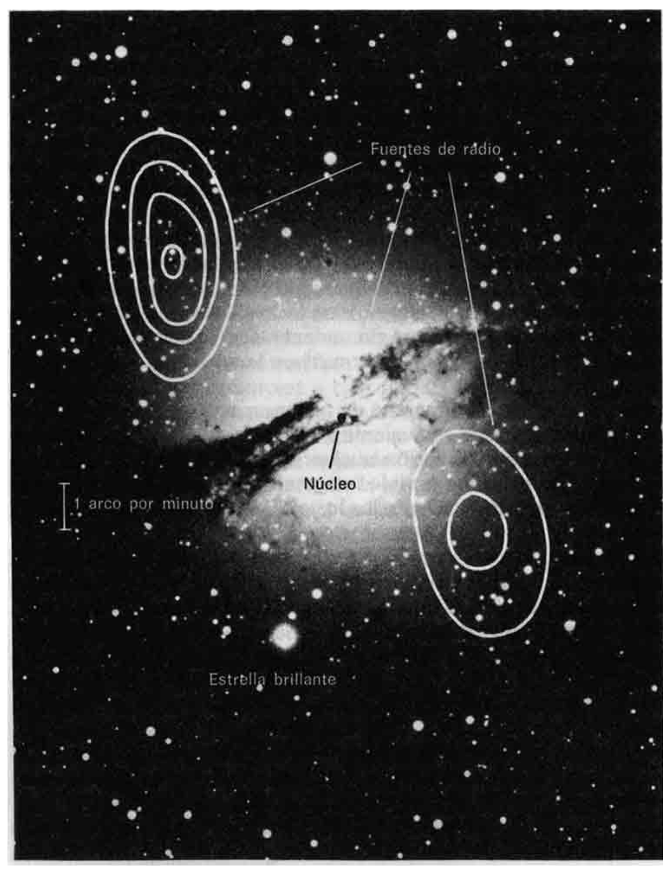
condiciones adecuadas, el proceso de conversión de energía puede ser más eficiente que ningún otro, excepto la aniquilación materia-anti- materia, dado que se convierte en radiación energética un 10 o 20% de la masa del material que penetra. Y eso nos lleva de nuevo a los repentinos estallidos energéticos como el de otoño de 1975 del AO 0235+164.

Para una conversión eficiente de masa-energía del 10 ó 20%, un quasar típico debe engullir alrededor de una o dos masas solares al año, una cantidad razonable de materia para una galaxia que puede contener varios miles de millones de estrellas, lo cual da a entender que hay una provisión de combustible que puede durar millones de años, así como la posibilidad de crear un agujero negro- central de quizá cien millones de masas solares y que queden aún suficientes estrellas en el disco circundante para convertirse en una galaxia ordinaria cuando la actividad del quasar cese. El colapso de gas residual hacia el centro de un antiguo superhalo proporciona diversas maneras en que podría formarse un agujero negro; el centro de la propia nube de gas podría colapsarse y convertirse directamente en un agujero negro, o podría producir unas cuantas estrellas muy masivas que estallaran y cuyos restos formaran agujeros negros que se fusionarían entre sí en el corazón de la galaxia embrionaria. Incluso es posible que se formara un cúmulo central de cientos de millones de estrellas y que éstas desarrollaran un ciclo normal hasta convertirse en un cúmulo de agujeros negros, que se fusionarían para formar uno solo, todo ello durante los primeros estadios de la formación de las galaxias tal como hoy las conocemos. Después de todo, la fase de la actividad de la bola de fuego y la formación de los superhalos tuvo lugar en los primeros 2.000 millones de años de los 15.000 millones que el Universo tiene; el colapso del gas residual hacia el centro de los halos tuvo que haber provocado una explosión de actividad violenta, hasta que las cosas se calmaron y se estableció un nuevo modelo ordenado (típicamente una galaxia espiral), quizá 10.000 millones de años antes de llegar al estado presente de, digamos, nuestra Galaxia. Y esto explica, con cierta claridad, por qué los quasars más brillantes son los que presentan

mayores desplazamientos hacia el rojo. Recuérdese que cuanto más lejos está un objeto, más tarda su luz en llegar hasta nosotros; en el caso de un quasar con un elevado grado de desplazamiento hacia el rojo puede que estemos viéndolo por una luz que partió de él cuando el Universo tenía sólo 4.000 millones de años de edad y el agujero negro todavía absorbía la materia que le rodeaba. Pero cuando contemplamos una galaxia con un desplazamiento hacia el rojo que corresponde a una velocidad de recesión mucho más pequeña, la podemos ver tal como era mucho más recientemente, cuando las cosas ya se habían calmado mucho más.

Aunque la mayor explosión de formación masiva de agujeros negros y la actividad de los quasars ocurriera al principio de la historia del Universo —lo cual se confirma por el hecho de que vemos más quasars con un alto desplazamiento hacia el rojo que cercanos—, el proceso puede que todavía prosiga en algunas galaxias que han evolucionado con más lentitud, lo cual explica los quasars que vemos relativamente cerca. Y los estadios intermedios del proceso, los diversos tipos de precursores de agujeros negros que quizá se forman en los centros de las galaxias, pueden muy bien explicar la variedad de galaxias activas intermedias entre las "normales" y los quasars, como son las galaxias N, las Seyfert y los objetos *BL Lacaertae.* Por su parte, las explosiones Seyfert puede que ocurran cuando el antiguo agujero negro central formado durante la actividad original del quasar trata de capturar materia de la galaxia que lo rodea y destella por breve tiempo en un retomo en pequeña escala a sus días de gloria originales. Esta es la explicación que encuentro más satisfactoria para entender por qué toda galaxia espiral pasa alrededor del 1% de su existencia en explosiones intermitentes de actividad del tipo de Seyfert. El material con que se alimenta el agujero negro central podría estar constituido por gases procedentes de las estrellas, los restos de estrellas que han colisionado unas con otras cerca del núcleo central, o incluso por estrellas enteras capturadas por las fuerzas de atracción del agujero negro cuando sus órbitas las acercan peligrosamente a éste. Debe recordarse que una explosión de

quasar requiere sólo una o dos masas solares al año, y que una galaxia Seyfert es un producto de energía con tan sólo una fracción de la potencia de un quasar.



La galaxia Centauro A también puede albergar un agujero negro energético. Además de la peculiar estructura de la galaxia misma, existen fuentes de ondas de radio tanto en el centro como en ambas mitades, lo cual sugiere la existencia de explosiones de energía en algún momento del pasado. El objeto brillante debajo de la galaxia es una estrella del primer término de nuestra propia Galaxia. *(Fotografía del Anglo Australian Telescope*.)

Ningún modelo realmente satisfactorio de quasar explica la formación de las estructuras de radioemisión en forma de "doble lóbulo", en cambio la teoría del agujero negro sí lo hace. El agujero negro debe estar en rotación, y con mucha rapidez si consideramos hasta qué punto se ha contraído la nube de gas al formarlo, de modo que el turbulento material que lo rodea se concentra en un disco. En una situación tal, las partículas energéticas, que se producen en las colisiones entre átomos encauzados hacia el interior del agujero, escaparán a lo largo de las "líneas de menor resistencia" desde los "polos" del sistema en rotación. La radiofuente más grande que se conoce se extiende a 20 millones de años luz, lo cual demuestra que ha tenido lugar una constante producción de partículas energéticas durante 20 millones de años, con los haces dirigidos a lo largo de la misma alineación exacta por todo el tiempo. Además, hay también una fuente central muy compacta en el centro de la galaxia (3C236) que está igualmente alineada en la misma dirección exacta. Esta configuración se ajusta exactamente a la idea de un agujero negro en rotación de cuyos polos salen disparadas las partículas.

¿Y qué hay acerca de las fuentes muy potentes y de fluctuación rápida, como AO 0235+164? Casi con toda seguridad, éstos son casos en que el chorro apunta recto hacia nosotros; estamos, en efecto, viendo directamente desde abajo el agujero negro masivo y en rotación.

Sabemos, por el tamaño de fuentes como 3C236, que la actividad de los quasars puede continuar durante unos 20 millones de años. Pero no hay fuentes más grandes, lo cual sugiere que la actividad no puede continuar por mucho más tiempo que éste, cosa que corrobora el hecho de observar que quedan pocas radiofuentes potentes y pocos quasars activos en el Universo. Debe de haber, no obstante, muchos quasars muertos en el corazón de las galaxias y es interesante observar nuestros vecinos cercanos del Universo para descubrir evidencias de su presencia. La mejor candidata para ser un quasar muerto es probablemente la radiogalaxia *Centaurus A*, a unos cinco megaparsecs de distancia. Posee un extenso par de lóbulos de radio que

ahora radian sólo muy débilmente comparado con objetos como 3C236 o AO 0235+164, más una diminuta fuente de radio y rayos X en el centro de la galaxia de sólo un día luz de diámetro. Probablemente es un agujero negro de unos 10 millones de masas solares, que brilla gracias a la energía liberada por material residual que gotea en su interior.

Pero la galaxia más interesante desde el punto de vista humano es esta en que vivimos. ¿Hay alguna prueba de que nuestra Vía Láctea fuera, alguna vez, un quasar? Hay, ciertamente, testimonios firmes de actividad violenta en el corazón de la Vía Láctea. Las observaciones de radio revelan nubes de gas que se alejan del centro, e incluso delgados chorros de material procedentes del núcleo. En el corazón de nuestra Galaxia hay un disco de material en rotación, a unos 1.500 parsecs de diámetro, con un anillo en expansión de gas frío, de 380 pcs de diámetro, incrustado en él. La región central contiene nubes ricas en toda clase de moléculas detectadas en el espacio interestelar, y existe una radiofuente potente (para los estándares galácticos) justo en el centro de la galaxia. Esta fuente mide sólo unos cien millones de kilómetros de diámetro, y podría muy bien ser el resultado de un lento flujo de acreción hacia un agujero negro central. Pero podemos adquirir cierta idea de la masa del objeto que hay en el núcleo mediante nuestro viejo amigo, el desplazamiento Doppler, que nos revela la velocidad con que las nubes centrales describen su órbita alrededor del centro. Un objeto central más masivo mantendría su velocidad superior en las órbitas de las nubes (de la misma manera que un objeto más masivo tiene una velocidad de escape mayor), y las pautas de velocidad observadas sugieren un objeto central con una masa de unos 5 millones de veces la del Sol. Eso no es suficiente para poner en marcha un quasar desarrollado —a pesar de que sea impresionante para un objeto tan pequeño para caber dentro de la órbita de Júpiter alrededor del Sol. Pero puede bastar para iniciar las explosiones Seyfert cuando cae en él la suficiente concentración de materia.

Por la distribución de los elementos principales que se detectan ahora alejándose rápidamente del centro, podemos incluso establecer una buena conjetura de cuándo tuvo lugar la última gran explosión en el núcleo de nuestra propia Galaxia. Se deduce que ocurrió hace sólo 12 millones de años, una minúscula fracción de la historia de nuestra Galaxia, o de nuestro propio Sistema Solar, y ello sugiere que en el pasado inmediato, según los estándares cósmicos de tiempo, nuestra propia Galaxia se encontraba en el estado Seyfert. Algunos astrónomos han especulado que esa clase de explosiones, que tienen lugar cada doscientos millones de años aproximadamente, podrían hacer llegar algo de su influencia a través de la Galaxia hasta perturbar el Sistema Solar e incluso nuestro propio planeta Tierra, produciendo tensiones (quizás en la forma de oleadas de radiación cósmica) que podrían explicar las algo súbitas "extinciones" de muchas especies de plantas y animales que se encuentran en el registro geológico. También cabe que la actividad pueda explicar la estructura espiral que se observa en el disco de nuestra Galaxia y de otras. Por cálculos sencillos de cómo las configuraciones en espiral pueden cambiar por el movimiento de rotación de las galaxias, resulta que esta configuración no perduraría más de unos mil millones de años antes de quedar igualada por la rotación. La aparente permanencia de la configuración en las galaxias espirales puede explicarse por una teoría de la onda de densidad, en la que la configuración espiral se considera que es una onda de choque que se mueve alrededor del disco, y si el agujero negro central está implicado en explosiones cada pocos cientos de millones de años, entonces cada cataclismo de éstos podría generar su propia configuración espiral, resultado de la combinación de una explosión hacia fuera y del movimiento aproximadamente circular de las estrellas en órbita alrededor del núcleo central. En ese caso, la configuración se renovaría repetidamente, y cada configuración en particular podría perfectamente durar mucho menos de mil millones de años entre cataclismo y cataclismo. La teoría de la onda de choque —o de explosión— es muy buena a condición de que pueda explicarse de dónde viene la explosión, y

la idea de un núcleo galáctico activo, un agujero negro con una masa de 5 millones de veces la solar, implicado en repetidas explosiones Seyfert parece ser muy adecuada.

Sería sorprendente que toda esta actividad no tuviera ninguna influencia sobre el Sistema Solar, y, en efecto, las mejores teorías actuales ven una relación muy estrecha entre la formación y evolución del Sistema Solar y la naturaleza de la Galaxia espiral en la que vivimos. La estructura espiral, a su vez, parece ahora que tiene relación con la naturaleza del agujero negro central, y éste y la propia Galaxia brillante son residuos de la formación de una enorme supergalaxia originada en la fluctuación isotérmica en la era de la recombinación, hace 15.000 millones de años o más. De manera que cuando sólo empezamos a ver cómo se han formado el Sol y su familia de planetas, hemos recorrido ya un gran trecho en la cadena de entrelazados y, alguien podría decir, improbables acontecimientos. ¡Y eso que ni siquiera hemos empezado a considerar el rompecabezas del origen de la vida!

III. EL ORIGEN DE NUESTRO SISTEMA SOLAR

El origen de nuestro Sistema Solar está íntimamente entroncado con la naturaleza de nuestra Galaxia, de la misma forma que ésta fue resultado de la estructura subyacente de todo el Universo. A cada paso en la cadena que va desde el *Big Bang* hasta el hombre mismo, encontraremos esta íntima relación con lo que ha sucedido anteriormente; y en última instancia, esto nos revela que la clase de criaturas que somos depende no sólo de la clase de planeta en el que vivimos, sino de la exacta naturaleza física del propio *Big Bang*, el origen del Universo. Somos criaturas de nuestro Universo, y criaturas como nosotros no podrían existir sin que el Universo fuera tal como es.

Cuando nos ocupamos del problema de cómo se originó nuestro propio Sistema Solar —el Sol con su familia de planetas y restos cósmicos— estamos empezando a planteamos, sin embargo, unas cuestiones mucho más específicas que las planteadas hasta ahora acerca de la naturaleza del Universo y del origen de las galaxias. En ese vasto recorrido por el espacio y el tiempo, las respuestas tienen que ser inevitablemente muy generales y, por tanto, "fáciles" en el sentido de que no tratan de datos específicos. Pero el problema varía algo si deseamos explicar por qué existe una estrella con la masa de nuestro Sol, con una familia concreta de planetas, cada uno de ellos a una distancia determinada del Sol y cada uno de ellos con su masa específica. Ahora, debido a que planteamos preguntas más precisas, las "respuestas" de los teóricos pueden parecer, en muchas ocasiones, más vagas. Pero aún podemos describir en términos generales cómo una estrella de la Población I (población del disco) nace de una nube de gas interestelar, acompañada de un séquito de planetas.

Dado que nuestro Sol es un miembro de la población del disco de nuestra Galaxia espiral, y puesto que el foco de atención de este libro es cómo hemos sido creados *nosotros* a partir de la caótica bola de fuego que fue el inicio del Universo, al llegar a este punto hemos de saltamos deliberadamente algunos rompecabezas intrigantes acerca no sólo del Universo en general, sino de nuestra Galaxia. Puesto que nuestra Galaxia no es un quasar, o una potente radiofuente, o una elíptica, por ejemplo, la historia del desarrollo de la vida humana en ella no depende de la naturaleza de los quasars, ni de las potentes radiofuentes ni de las elípticas; dado que nuestro Sol es un miembro del disco de Población I, la historia del Sistema Solar no depende de ninguna manera en detalle de la naturaleza de las estrellas más viejas del halo de la Población II, y aún menos de las estrellas del superhalo de la Población III, una vez hemos visto que la presencia del disco, y su velocidad de rotación, quedó determinada hace mucho tiempo cuando la protogalaxia se estaba empezando a formar a partir de una fluctuación en la ya agonizante bola de fuego. El problema central, para nosotros los humanos, es cómo se formaron las estrellas de la Población I, y sus planetas, en el seno del disco en rotación característico de una Galaxia espiral como nuestro sistema de la Vía Láctea.

UNA GALAXIA DE ESTRELLAS

Visto desde encima, el disco de nuestra Galaxia se parecería a una enorme girándula, con una protuberancia central de unos siete kiloparsecs de diámetro y rodeada por unos brazos espirales que cubren un diámetro total de unos treinta kiloparsecs. El Sol está situado a dos tercios de camino entre el centro y el borde, a unos 10 kpc del núcleo de nuestra Galaxia. Este es un lugar que no tiene nada de especial; nuestro Sistema Solar no está ni cerca del núcleo ni en el mismo borde de la Galaxia, y parece ser un sistema muy corriente en una parte muy corriente de la Galaxia. A la distancia del centro de donde está situado el Sol, el disco tiene un grosor de unos 800 parsecs; la protuberancia central tiene unos 3 kpc de grosor, y desde el

Sistema Solar hacia fuera, el disco se hace un poco más delgado.

El sistema en conjunto contiene unos 100.000 millones de estrellas, lo cual corresponde a una gran espiral —no espectacularmente grande, pero sí lo suficiente para justificar la clasificación de nuestra Vía Láctea como una “espiral gigante”. De manera que, al fin, hay *algo* ligeramente fuera de lo corriente en nuestro hogar en el Universo.

Toda esta información no procede, por supuesto, de un observador imaginario que contemplara el disco desde arriba, sino de cuidadosas observaciones desde la posición del Sistema Solar incrustado en el disco a dos tercios del camino hacia el borde. Es más bien como si un observador estuviera sentado en un bosque con una brújula y alguna clase de telémetro, de modo que, sin moverse, pudiera marcar las posiciones de todos los árboles visibles y trazar un mapa de la parte del bosque donde está. Si los árboles estuvieran distribuidos según una pauta regular, podría llenar los espacios en blanco del mapa —los árboles fuera de su vista— conjeturando dónde deberían estar para seguir la pauta regular. En nuestra Galaxia, la regularidad viene proporcionada por la estructura espiral; las observaciones ópticas, con infrarrojos y de radio (especialmente en la longitud de onda de 21 cm, característica de la radiación de las nubes de hidrógeno), proporcionan los ojos del observador; y la telemetría depende de una variedad de técnicas, pero especialmente del comportamiento regular de las variables cefeidas mencionadas antes. Con la determinación de las velocidades gracias al ubicuo desplazamiento Doppler (con toda seguridad, la “herramienta” más valiosa para la observación astronómica), conocemos la rotación de toda la Galaxia, así como el movimiento tanto de las estrellas individuales como de los cúmulos de estrellas.

Es la rotación la que “sostiene” el disco contra la gravedad, por supuesto, pero sólo en el plano de éste. En cierto sentido, el disco se está todavía formando —con seguridad, todavía evoluciona—, dado que nuevas estrellas siguen naciendo en él. Y, en la medida en que el material de la Galaxia (propiamente,

el material residual de los ya lejanos días de gloria del superhalo) todavía se está asentando bajo la fuerza de la gravedad y a través de sucesivas colisiones entre las nubes de gas, la región de actividad del disco se hace más delgada. Las estrellas más viejas del disco están esparcidas por un grosor total de unos 700 u 800 parsecs; las más jóvenes, recién formadas (incluyendo muchas estrellas O, masivas y calientes), están confinadas en una angosta región de un grosor de sólo 80 pe. Y nuestro Sol, mostrando de nuevo su poco excepcional mediocridad, es una estrella de edad madura que vaga por no más de 80 pe hacia arriba o hacia abajo del plano del disco.

Las estrellas del disco forman grupos, y las propias estrellas tienden a ser pequeñas, la mayoría de ellas con sólo una décima parte de la masa del Sol. De manera que, por lo menos, el Sol es más grande que la media, si bien de ninguna manera es una gigante, en términos estelares. Parece ser que las estrellas del disco forman cúmulos abiertos, con muchas estrellas que nacen del colapso de una nube de gas, y que los cúmulos se dispersan gradualmente a medida que las estrellas individuales orbitan alrededor de la Galaxia. Las edades de los cúmulos pueden determinarse por el color de las estrellas, que depende de la temperatura de su superficie, y cambia a medida que cada estrella se hace más vieja; se conocen algunos cúmulos que tienen unos pocos millones de años, y otros tienen edades que se elevan a unos miles de millones. En conjunto, se han identificado más de 700 de estos cúmulos "abiertos" en la vecindad intermedia (en 2 kpc) de nuestro Sistema Solar. ¿Qué hace que una nube de gas se colapse para formar un gran cúmulo abierto de estrellas? Eso, según parece, depende muchísimo de la estructura del propio disco.

En primer lugar, el disco no gira como una rueda sólida. Cada estrella —y cada sistema solar— describe una órbita alrededor del centro de la Vía Láctea a su propia velocidad, la cual depende de la distancia a que se encuentra del centro. Si están muy cerca, su velocidad orbital tiene que ser mayor para evitar que sean arrastradas hacia el centro por la gravedad, de

modo que sólo permanecen allí las estrellas que se mueven rápido; las demás han sido engullidas por el agujero negro central. Más lejos, donde la atracción de la gravedad es menor, una marcha más pausada será suficiente para mantener a la estrella segura en su órbita aproximadamente circular. Por lo tanto, el disco como un todo se encuentra en rotación diferencial, con sus regiones interiores que giran más rápidamente que las exteriores. Pero unos términos como “pausado” son relativos — en el caso de nuestro propio Sistema Solar, la velocidad orbital es de 250 km/s (es decir, nos movemos por el espacio alrededor de la Galaxia a unos 900.000 km/h)—, lo cual es bastante impresionante. No obstante, incluso a esa velocidad, el Sol y el Sistema Solar necesitan unos 250 millones de años para dar una vuelta completa a la Galaxia. Desde que el Sistema Solar se formó, ha circunnavegado el disco galáctico sólo veinte veces, en unos 5.000 millones de años. Aun así, el hecho de que las estrellas del disco estén en un constante movimiento diferencial significa que la configuración espiral tan característica ahora tendría que romperse y “disolverse” en poco tiempo, ciertamente mucho menos tiempo que los 250.000.000 de años que tarda el Sol en completar su órbita en la Galaxia. La explicación normal de por qué la configuración espiral permanece aun cuando las estrellas siguen sus propias órbitas independientes es que las verdaderas características de las espirales no vienen dadas por las estrellas brillantes que se destacan tan claramente en las fotografías astronómicas, sino por las oscuras franjas de gas y polvo que hay junto a ellas. Los brazos espirales son esencialmente regiones donde el gas se encuentra concentrado y comprimido, y las estrellas brillantes nacen en realidad en sus bordes como resultado de la compresión. Esto explica la disposición de las estrellas brillantes, pero no explica del todo la estructura espiral, puesto que no hay ninguna teoría establecida de por qué el gas y el polvo deben formar una configuración en espiral. Casi con seguridad, esto está relacionado con la actividad violenta que tiene lugar en el núcleo de la Galaxia, donde las ondas de choque que se mueven desde el centro hacia fuera se interaccionan con el gas que se mueve en órbitas

circulares y forman una configuración en espiral. Lo que importa para la formación del Sistema Solar, no obstante, es que sí existió una configuración en espiral de material concentrado (una “onda de densidad”) desde el principio de la historia del sistema discoidal de la Vía Láctea, y que esa onda de densidad produjo una repetida compresión de cierta nube de gas que describía órbitas alrededor del centro de la Galaxia a una distancia de unos 10 kpc.

LUGAR DE NACIMIENTO DE LAS ESTRELLAS

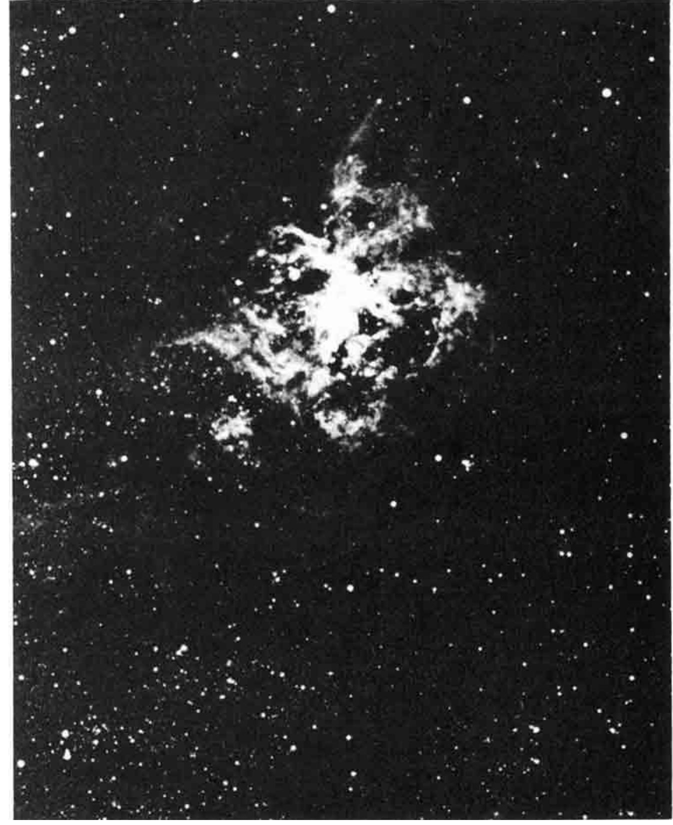
Cada vez que una nube así atraviesa un brazo espiral (lo cual ocurre dos veces en cada órbita, una en cada lado de la Galaxia, si es que hay dos brazos, como suele ser habitual en las espirales), es aplastada por la onda de compresión. Puede “desaplastarse” un poco, cuando sale por el otro lado, pero así y todo, acaba siendo más pequeña y más densa que antes del pasaje (lo cual significa más compactada por su propia gravedad). Después de unas cuantas órbitas alrededor de la Galaxia, al ser aplastada un par de veces en cada órbita, la nube se colapsará por completo y se fragmentará en protoestrellas, cuando la fuerza de su empuje gravitacional sea suficiente para romper la nube en pedazos. En algunos casos, la “última gota” que desata el colapso final de la nube puede ser una onda de choque adicional, proveniente de la explosión de una supernova cercana, una estrella masiva que ha llegado violentamente al final de su vida. Estas estrellas de gran masa se forman a su vez en el denso material de los brazos espirales, pero su existencia puede durar tan sólo unos cuantos millones de años y estallan antes de que se hayan movido muy lejos en la Galaxia. Y las ondas de choque que provocan pueden provocar la formación de estrellas en otras nubes de aquella parte del brazo espiral. Esto, de hecho, es lo que parece que sucedió en el nacimiento de nuestro propio Sistema Solar.

Las explosiones de supernovas marcan un posible modo de morir de una estrella, y a su debido tiempo explicaré cómo algunas estrellas llegan a un estado explosivo. Por ahora, todo lo

que necesitamos saber es el hecho de que algunas estrellas efectivamente explotan, mientras brillan por pocos días como toda una Galaxia de estrellas normales, y envían ondas de choque que se abren paso a través de las tenues nubes de gas y polvo del espacio interestelar. También esparcen por el espacio material procedente de la estrella que ha explotado, que se mezcla con el material de las nubes interestelares y enriquece la mezcla de la que se formarán nuevas estrellas (y planetas).

Este material de la supernova es lo que proporciona una firme evidencia de que nuestro propio Sistema Solar se originó a consecuencia de alguna explosión estelar así.

La evidencia procede directamente de los meteoritos, fragmentos de rocas interplanetarias que de vez en cuando caen en la Tierra. Estos meteoritos se cree que son trozos residuales del material a partir del cual se formó el Sistema Solar, que todavía describen órbitas alrededor del Sol y que de cuando en cuando colisionan con la Tierra. Los fragmentos más pequeños se queman por completo en la atmósfera como meteoros, y este bombardeo meteórico prosigue sin cesar en forma de partículas del tamaño de un grano de arena que llueven sobre la Tierra. Con menos frecuencia nos llegan pedazos suficientemente grandes para sobrevivir a la ígnea caída a través de la atmósfera, y muchos de ellos ni siquiera pueden encontrarse, puesto que caen en el mar o en un desierto, jungla o región montañosa poco poblados. Algunos meteoritos gigantescos han alcanzado la Tierra durante su vida y han provocado cráteres como los de la Luna, la mayoría de los cuales han desaparecido debido a la erosión, pero algunos de ellos, como el “Meteor Cráter” de Arizona, todavía son visibles. Y han podido encontrarse algunos pedazos de meteoritos de mediano tamaño, que se han estudiado en los laboratorios científicos.



La nube incandescente de gas y polvo en el espacio señala el lugar de una activa formación de estrellas en la Gran Nube de Magallanes, pequeña galaxia irregular situada junto a la nuestra. La nube resplandece porque el hidrógeno que contiene es activado por las jóvenes estrellas calientes de su interior, de manera semejante a como el gas de los tubos de los anuncios es activado por la electricidad. Pronto —en la escala de tiempo galáctico— el hidrógeno se disipará en el espacio, dejando atrás las nuevas estrellas. (Fotografía realizada con el Anglo Australian Telescope.) *(Cortesía del Science Research Council.)*



Cuando una estrella muere en una explosión de supernova desparrama material por el espacio en regueros de gas. Eventualmente, este material, que incluye elementos pesados, llega a integrarse en las nubes de gas y de polvo que se condensan para formar nuevas estrellas. *(Fotografía del Lick Observatory.)*

Estos estudios recibieron un notable impulso a finales de los años sesenta, cuando se desarrollaron nuevas técnicas sobre

todo para analizar rocas lunares que trajeron a la Tierra los astronautas del *Apolo*. En 1969, un gran meteorito cayó cerca del pueblo de Pueblito de Allende, en México, con unas dos toneladas de material que habían sobrevivido a la caída y se habían fragmentado en trozos recuperables. Este meteorito de Allende ha sido analizado con más detalle que probablemente cualquier otro anterior, en la creencia de que contiene materiales que no han variado desde la época de la formación del Sistema Solar, hace unos 5.000 millones de años[16]. Este material presenta algunas diferencias importantes con respecto al material de la superficie de la Tierra, que ha experimentado, como es lógico, algunos cambios drásticos desde que se formó el Sistema Solar. La evidencia clave reside en las cantidades de ciertos isótopos de elementos determinados existentes en las muestras del meteorito.

Los elementos se presentan en diversas variedades llamadas isótopos, que son químicamente idénticas, pero con átomos de diferente peso. El oxígeno, por ejemplo, se encuentra normalmente en forma de isótopo oxígeno-16, cada átomo del cual está constituido por un grupo de ocho protones de carga positiva y ocho neutrones neutros (el núcleo) rodeados por una nube de ocho electrones eléctricamente negativos. Otros dos isótopos son el oxígeno-17 y el oxígeno-18, que se diferencian del oxígeno-16 sólo por tener, respectivamente, uno y dos neutrones más en sus núcleos. Esto no afecta su comportamiento

[16] ¿Cómo podemos saber la edad del Sistema Solar? El mejor “reloj” nos lo proporciona la desintegración radiactiva espontánea de algunos materiales tales como el uranio 235 y el uranio 238. A lo largo de millones de años, estos átomos radiactivos se desintegran y producen finalmente átomos estables de plomo, al mismo tiempo que desprenden helio que puede quedar atrapado dentro del material congelado de algún meteorito en el espacio. Cuando el meteorito choca contra la Tierra y es recuperado, es posible deducir la cantidad de helio y compararla con la cantidad de uranio que aún queda en el material. Cuanto más antigua sea la muestra, más helio contendrá en relación con el uranio; y aunque parezca bastante raro como mecanismo de relojería, es de hecho lo suficiente exacto para establecer la edad de los meteoritos más viejos (y, por lo tanto, del Sistema Solar) en algo más de 4.500 millones de años y con seguridad menos de 5.000 millones de años.

químico, que depende del número de electrones y de su distribución; pero sí los hace físicamente distinguibles, puesto que el oxígeno-17 es más pesado que el oxígeno-16, y el oxígeno-18 todavía lo es más. Todos estos isótopos del oxígeno son estables. Pero algunos isotopos de ciertos elementos son radiactivos, emiten espontáneamente partículas y se transforman en otros elementos. El aluminio-26, por ejemplo, contiene trece neutrones y trece protones en su núcleo, pero es inestable (la forma estable, el aluminio-27, tiene un neutrón extra). La inestabilidad se revela porque cada uno de los átomos de aluminio-26 emitirá, con el tiempo, un positrón (la contrapartida cargada positivamente del electrón), convirtiéndose un protón del núcleo en un neutrón y transformándose el átomo en magnesio-26 (doce protones, catorce neutrones). El comportamiento muy regular del proceso de desintegración radiactiva significa que en cada muestra escogida de un isótopo radiactivo determinado, la mitad de los átomos se desintegrarán de esta manera en un tiempo característico de ese isótopo en particular. En el caso del aluminio-26, la "media vida" es de 700.000 años, de modo que todos los Al-26 presentes en la formación del Sistema Solar debieron de haberse formado muy poco tiempo antes, en la escala del tiempo cósmico, y todos deben haberse desintegrado ya, convirtiéndose en magnesio-26.

Esto es precisamente lo que se encontró en las muestras del meteorito de Allende: magnesio-26, que sólo pudo haberse formado por la desintegración del aluminio-26 dentro del meteorito, después de la formación del Sistema Solar. (Los otros dos isótopos estables del magnesio, magnesio-24 y magnesio-25, pueden haberse formado de otras maneras, pero sucede que el isótopo 26 *sólo* puede formarse a partir de la desintegración del aluminio-26.) Por lo tanto, la nube de la cual el Sistema Solar nació, contenía aluminio-26, que debió de producirse en algún lugar y se esparció por la nube justo antes de que se colapsara[17].

---

[17] "Justo antes" significa aquí alrededor de un millón de años, o sea, un instante considerando la escala de tiempo en la que se sitúa una revolución del Sol alrededor de la Galaxia.

Además, las proporciones de los isótopos de oxígeno encontradas en las muestras del meteorito de Allende son diferentes de las de la Tierra; parece haber más oxígeno-16, que también debió de proceder de "fuera" de la nube de gas colapsada. Y también hay otras diferencias sutiles entre la abundancia de isótopos en el meteorito y lo que sería de esperar que hubiera si la nube simplemente se hubiera colapsado bajo su propia fuerza de gravedad. La mejor forma de crear isótopos exóticos es una explosión de una gran supernova, un proceso tan energético que los átomos se rompen y los núcleos atómicos se reúnen en nuevas y exóticas combinaciones antes de ser lanzados al espacio. La única manera de explicar la abundancia de isótopos que se encuentran en los meteoritos sería que una supernova hubiera hecho explosión cerca de la nube de gas que dio origen al Sistema Solar justo antes de colapsarse. En ese caso, parece más que probable que habría sido la explosión de la supernova la que habría desatado el colapso; utilizando medios aún más sutiles para la medición de la abundancia de isótopos, astrónomos como David Clark, del Royal Greenwich Observatory, estiman que debió de producirse una supernova anterior cerca de la nube, unos 100 millones de años antes. Resulta que éste es el tiempo que tarda nuestro Sistema Solar en atravesar el espacio que hay desde un brazo espiral al siguiente, en su órbita alrededor de la Galaxia. De modo que quizá la primera supernova ayudó a disponer el escenario al comprimir la nube presolar en un brazo espiral, y después, 100 millones de años más tarde, vino el apretón definitivo de la mano de otra supernova en el otro brazo espiral. En ese momento, la gravedad de la nube pudo tomar el poder. Al mismo tiempo que la nube se destruía por la fuerza de su propia gravedad, se formaban muchas estrellas que desde entonces se han ido separando y esparciendo alrededor de la órbita del Sol a través del espacio. Sólo un fragmento de aquella nube original, dominada ahora por la fuerza de su propia gravedad al aumentar su densidad, estaba destinado a formar la estrella que llamamos Sol y una familia de planetas, entre los que se encuentra la Tierra, que juntos constituyen nuestro Sistema Solar.



Los más modernos telescopios y las más recientes técnicas fotográficas nos brindan una espectacular riqueza de detalles, como en esta fotografía de un reguero de material interestelar, del que se forman nuevas estrellas y sistemas solares. *(Fotografía tomada con el telescopio Schmidt, cedida por el Royal Observatory de Edimburgo.)*



La nebulosa Cabeza de Caballo es una espectacular área de gas frío, silueteada contra un material interestelar más caliente, suavemente brillante. Forma parte del complejo de estrellas y nebulosas situadas cerca de la espada y el cinturón de Orión; la estrella azul brillante de la izquierda de la "cabeza de caballo" es la estrella más oriental del cinturón de Orión, la Zeta de Orión. *(Fotografía tomada con el telescopio Schmidt, cedida por el Royal Observatory de Edimburgo.)*



Messier 8, la nebulosa de la Laguna, muestra algunas de las formaciones conocidas como glóbulos de Bok. Éstos son áreas de material polvoriento, fotoabsorbente, del espacio. La nebulosa tiene un diámetro de 30 años luz y se encuentra situada a una distancia de 4.000 años luz. *(Fotografía tomada con el telescopio Schmidt, cedida por el Royal Observatory de Edimburgo.)*

UN DISCO EN ROTACION

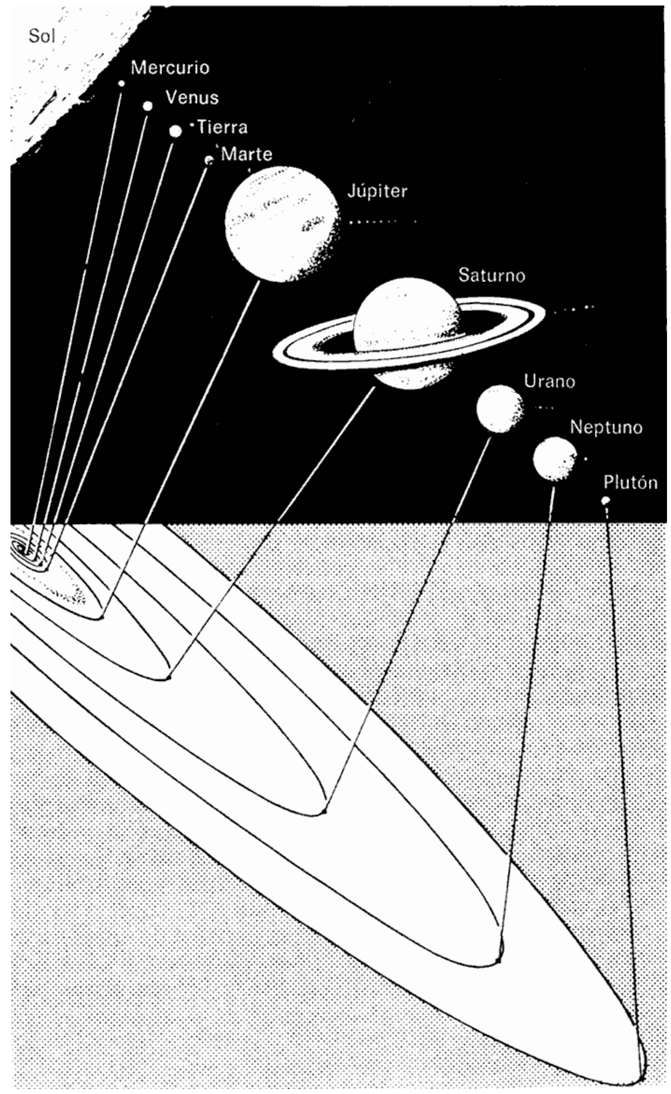
La naturaleza del Sistema Solar, al condensarse a partir de una nube de gas que se colapsaba, estuvo determinada por la rotación. Del mismo modo que, a una escala mucho mayor, la rotación convirtió una nube de gas en el disco aplanado que constituye la Vía Láctea, donde vivimos, la rotación de la nube de gas presolar convirtió en un disco parte del material que se colapsaba. En realidad, gran cantidad de este material pasó a constituir, en el centro, una bola más o menos esférica —el Sol—, pero sólo pudo colapsarse hasta este extremo porque el momento angular de la nube de gas original estaba extendido por todo el material restante del disco. El Sol acaparó la mayor parte de la masa, pero el disco conservó la mayor parte del momento angular.

Puede parecer una exageración definir la familia de planetas del Sol como un disco, pero en términos del Sistema Solar como un todo, no hay duda de la validez de la descripción. No es como si hubiera un único cuerpo pequeño que describiera la órbita alrededor de otro, como la Luna alrededor de la Tierra. En el Sistema Solar hay nueve planetas conocidos, que se mueven todos ellos de la misma forma alrededor del Sol; muchos de estos planetas tienen lunas, y casi todas ellas giran alrededor de sus planetas en el mismo sentido en que estos planetas giran alrededor del Sol, mientras que los propios planetas, con la excepción de Venus y Urano, giran alrededor de su eje también en el mismo sentido. Este sentido de rotación dominante de todo el material del disco es igualmente la dirección de rotación del propio Sol, que gira alrededor de su eje una vez cada 25,3 días. Y, por último, todo este material que gira de la misma manera alrededor del Sol se encuentra concentrado en un disco delgado, el plano de la elíptica. Esta evidencia demuestra claramente la íntima relación que existe entre el Sol y los planetas, y no deja lugar a ninguna duda de que se han formado juntos. Si los planetas hubieran sido captados de alguna manera por el Sol durante sus viajes alrededor de la Galaxia, no estarían dispuestos de una forma tan regular, todos en el mismo plano y

con órbitas esencialmente circulares; si el Sol se hubiera formado por su cuenta a partir del colapso de una gran nube de gas, tendría una velocidad de rotación mucho mayor de la que tiene ahora; en realidad, nunca se hubiera colapsado en la compacta bola que es en la actualidad. Una nube de gas que se colapsa *tiene* que perder momento angular para llegar a colapsarse lo suficiente y convertirse en una estrella, y la mejor forma de conseguirlo es desarrollar un disco en rotación de material. El material del disco puede, a su vez, colapsarse y formar planetas: los de mayor tamaño (especialmente Júpiter y Saturno) reproducen el mismo proceso en miniatura, y desarrollan sus propios discos de material, que se convirtieron en lunas o permanecen en forma de anillos, como en el caso de Saturno.

Los astrónomos todavía debaten los detalles de cómo los planetas se formaron a partir del disco situado alrededor del Sol. En un importante trabajo académico publicado en 1978 [18], veintiocho de los más eminentes teóricos de los tiempos modernos necesitaron no menos de 668 páginas para explicar el pensamiento actual sobre el problema del origen del Sistema Solar, y aun así, no pudieron llegar a una "respuesta" única —no hay un único modelo aceptado por todo el mundo—. Pero una gran parte del desacuerdo entre las teorías *es* sólo de detalle, y no representa ninguna disputa fundamental sobre la evidencia de que el Sol y los planetas se formaron juntos. Por lo tanto, la siguiente simplificación del pensamiento actual, si bien no puede ser presentada como correcta en todos sus detalles, da una visión general de las ideas que cada vez son más aceptadas, y estos detalles, aunque todavía son debatidos, es probable que se completen en un futuro no muy lejano.

[18] S. F. Dermott, *The Origin of the Solar* System (Nueva York. Wiley, 1978).



Los planetas de nuestro Sistema Solar, representados a escala, y la posición de sus órbitas en el disco de materia que rodea al Sol.

Desde este punto de vista, hay una característica básica del Sistema Solar —aparte de su existencia— que es de crucial importancia para la vida humana y que debe ser explicada por alguna teoría satisfactoria. ¿Por qué el Sistema Solar está constituido por dos clases de planetas, unos, pequeños y rocosos, cerca del Sol (incluyendo la Tierra) y otros, grandes y gaseosos, mucho más distantes?[19] Esto puede explicarse satisfactoriamente en términos de la evolución de un disco de material alrededor del Sol, calentado por la joven estrella en su centro. El calentamiento es de importancia fundamental, ya que dispersó el material lejos de la nebulosa en la cual el Sol se formó. Para explicar la lenta evolución del Sol, muchas teorías modernas exigen no sólo la transferencia de momento angular al disco, sino también una gran cantidad de material, tanto como el que tiene el propio Sol, extinguido del sistema por el ígneo homo de su núcleo. Sin embargo, mucho antes de que este homo se encendiera, ya había empezado el proceso que condujo a la formación de los planetas.

Diminutos granos de polvo que existían en la nube de gas original (la nebulosa) debieron de empezar a juntarse para formar pequeños "supergranos" esponjosos, quizá de unos pocos milímetros de diámetro, al tiempo que la nebulosa empezaba a contraerse y los granos entraban en colisión unos con otros cada vez más a menudo en una nube cada vez más densa. Estos supergranos constantemente bombardeados por los átomos de gas de la nube que se colapsaba, debían de ser muy susceptibles al proceso de transferencia del momento angular, y se instala-

[19] Plutón, que se considera el planeta más lejano que se conoce, es una excepción de esta pauta, puesto que está lejos y es pequeño y rocoso. Pero Plutón no parece ser un planeta "verdadero" en absoluto, puesto que sigue una órbita mucho más alargada que hace que en algunas épocas, como de enero de 1979 a marzo de 1999, esté más cerca del Sol que Neptuno. Con toda probabilidad, Plutón es una luna que ha escapado de alguno de los gigantes gaseosos y. por lo tanto, los planetas "genuinos" se dividen con bastante claridad en dos grupos de cuatro, separados por un cinturón de escombros cósmicos entre Marte y Júpiter, la zona de los asteroides.

rían rápidamente en el disco cuando éste empezó a desarrollarse alrededor del abultamiento central, la bola achatada del Sol embrionario. Esto hizo que los supergranos se concentraran en un espacio todavía más pequeño, lo que les daba amplias oportunidades de entrar en contacto unos con otros y de interaccionar a través de la gravedad. El resultado fue que se agruparon en fragmentos de mayor tamaño y formaron aglomeraciones de un kilómetro o más de diámetro, bastante parecidas a los meteoritos, que constituyeron los primeros objetos sólidos de un tamaño respetable del Sistema Solar. Mientras proseguía este proceso de amontonamiento (acreción), se formaron con el tiempo objetos de tamaño planetario, si bien los detalles del proceso de acreción y las razones de la exacta posición de cada planeta con respecto al Sol forman parte de los enigmas que aún debaten los expertos.

DOS CLASES DE PLANETAS

Es harto razonable atribuir a este proceso las dos clases de planetas que existen, aunque, una vez más, los detalles de la explicación no están resueltos del todo. Cerca del Sol, el calor de la joven estrella del centro era suficiente para expulsar cualquier material fácilmente volatilizable, de modo que en los trozos de materia cada vez mayores predominaban las sustancias que no se evaporaran con facilidad, como el hierro y los silicatos. A mayor distancia del Sol, no obstante, las partículas originales de la nebulosa retenían una capa de hielo, metano helado y amoniaco sólido, demasiado lejos del Sol para que estos materiales se evaporaran. Y de los restantes gases de la propia nebulosa, que rodeaban los trozos sólidos cada vez más grandes, los muy ligeros, como el hidrógeno o el helio, habrían sido dispersados, y sólo pudieron retenerlos los planetas muy alejados del calor del Sol. Por lo tanto, es del todo lógico que los planetas pequeños, densos y rocosos, se formaran cerca del Sol y los grandes y gaseosos se formaran en el Sistema Solar exterior. El proceso explica incluso algunas diferencias entre los cuatro planetas interiores, puesto que Mercurio parece ser muy

denso y compacto, casi como la Tierra en sus capas rocosas exteriores desnudas, mientras que la Tierra y Venus son bastante menos densos, y Marte lo es aún menos, con déficit (comparado con la Tierra) en muchos de los metales pesados que forman el núcleo de nuestro propio planeta.

Incluso cuando los planetas y sus lunas ya se habían formado, el joven Sistema Solar era aún un lugar activo. Todavía quedaba una gran cantidad de gas y polvo alrededor del Sol, y todavía quedaban muchos asteroides rocosos que eran barridos en colisiones y que sembraron de cráteres la Luna, Marte, Mercurio y Venus, y que están presentes, suavizados por la erosión, en la superficie de la Tierra. El joven Sol se calentó, en primer lugar, simplemente debido a la energía gravitatoria potencial que se liberó a medida que se contraía. No se convirtió en una verdadera estrella hasta que su centro estuvo lo suficiente caliente para iniciar reacciones de fusión nuclear, que han mantenido su resplandor durante los últimos 4.000 o 5.000 millones de años. Y cuando sucedió esto, antes de entrar en una fase de combustión nuclear estable, debió de producir una explosión de energía —calor— que barrió todo el material gaseoso restante que no estuviera firmemente sujeto a un planeta por la gravedad.

Todo esto fue una consecuencia natural del colapso de una nube de gas en el espacio, con una minúscula cantidad de polvo en forma de partículas interestelares. La diminuta cantidad de polvo se convirtió en planetas en órbita alrededor de una estrella, y no hay ninguna razón para dudar de que, siempre que se forma una estrella de esta manera, se produce también un sistema planetario. Muchas estrellas —quizá la mayoría— parece que forman parte de sistemas múltiples, en los que dos o más estrellas describen órbitas una alrededor de otra. Esta clase de sistema podría no ser adecuado para la formación de sistemas planetarios como nuestro Sistema Solar. Pero dondequiera que una estrella se forme aisladamente — aun cuando esto suceda con una minoría de las estrellas del disco, significa todavía millones de estrellas sólo en nuestra Galaxia— también se forma-

rán planetas como los de nuestro Sistema Solar. En nuestra Galaxia debe de haber muchos sistemas planetarios, y en algunos de ellos, puede muy bien haber planetas bastante parecidos a la Tierra. ¿Quiere decir esto que la vida —incluso vida inteligente— puede ser común? Eso depende no sólo de la presencia de planetas, sino también de la naturaleza de la estrella que haya en el centro del sistema planetario. Algunas estrellas son más hospitalarias, en términos humanos, que otras; y aunque de ahora en adelante la historia de nuestro origen debe centrarse inevitablemente en un solo planeta de un único sistema solar, podemos retener algunas ideas sobre nuestro lugar en el Universo con un rápido repaso al comportamiento de las estrellas.

UNA VARIEDAD DE ESTRELLAS

Es, por supuesto, imposible que los astrónomos se sienten a observar la evolución de estrellas individuales para descubrir su estilo de vida. Las estrellas como el Sol viven durante miles de millones de años, y sólo una pequeña minoría de estrellas muestra algún cambio significativo en el curso de una vida humana, o incluso en toda la historia de la civilización humana. En cambio, los astrónomos logran tener una idea de la evolución de las estrellas por el estudio de la gran variedad de ellas que hay en el cielo y que son accesibles a sus telescopios y a sus instrumentos de registro. En nuestra propia Galaxia se ven estrellas en todas las fases de evolución, desde el nacimiento hasta la muerte, y una vez identificadas las diferentes fases, es posible (aunque no sencillo) obtener un esquema general de cómo una estrella vive su vida. Es un poco como si un extraterrestre inteligente pudiera tomar una fotografía de todo lo que sucediera en la Tierra en un instante determinado. Aunque esta imagen inmóvil no cambiara, comprendería información de todas las fases de la vida humana, desde el nacimiento hasta la muerte, y el alienígena inteligente podría establecer el ciclo de la vida humana estudiando la evidencia de 4.000 millones de vidas, captadas en un instante del tiempo.

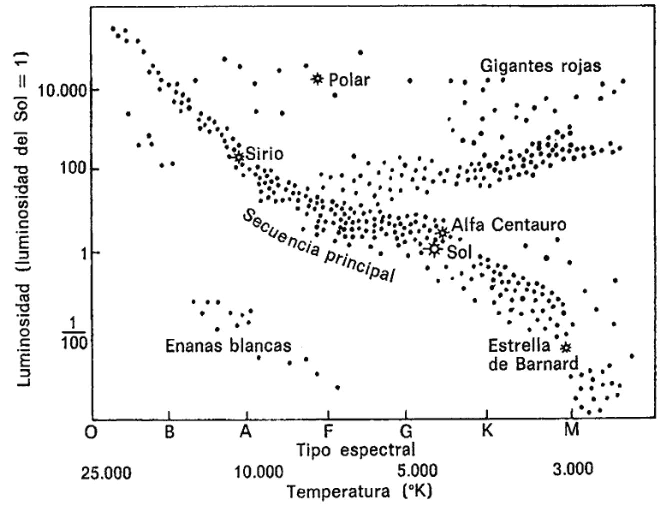


Diagrama de Hertzsprung-Russell, en el cual pueden apreciarse las relaciones entre los diferentes tipos de estrellas. Las de la parte superior izquierda de la secuencia principal son enormes, calientes, brillantes y de corta vida; las estrellas de la parte inferior derecha son frías, apagadas, pequeñas y de larga vida. Una estrella como el Sol combina calor suficiente para mantener habitable un planeta como la Tierra con una vida lo bastante prolongada como para permitir la evolución de la vida orgánica sobre tal planeta. No es ninguna coincidencia que criaturas como nosotros habitemos un planeta con agua y un cielo azul, dando vueltas a una estrella amarillo-anaranjada de tipo G.

Uno de los factores clave que se determinan a partir de nuestra “instantánea” astronómica de miles de estrellas en un instante dado del tiempo cósmico es la temperatura de cada estrella. Esta temperatura se determina por espectroscopia, técnica mediante la cual la luz se descompone en un espectro (o arco iris) de colores para su análisis. Tales espectros de la luz de las estrellas presentan, en general, unas nítidas rayas oscuras (en algunos casos, rayas brillantes) que atraviesan el espectro en unas longitudes de onda precisas. Éste es un fenómeno familiar en los estudios de laboratorio aquí en la Tierra, y los as-

trofísicos pueden identificar estas líneas con la energía absorbida o emitida por elementos atómicos o con las formas ionizadas de estos átomos. Ésta es la clave para tomar la temperatura de las estrellas. Un átomo se ioniza si pierde algunos de los electrones que mantienen el equilibrio con la carga eléctrica positiva del núcleo, y el número de electrones que se separan del átomo de cualquier elemento depende precisamente de la temperatura del gas que contienen estos átomos. Puesto que cada configuración de rayas espectrales corresponde a un átomo, o a un átomo ionizado, que la produce como si fuera su huella digital, el estudio de las configuraciones de rayas espectrales de la luz de cualquier estrella proporciona una buena indicación de la temperatura en la superficie de dicha estrella.

Al principio, las estrellas se clasificaron de esa forma a base de la intensidad de las rayas del hidrógeno ionizado (rayas del hidrógeno), en una escala alfabética, que comenzaba, muy lógicamente, por A, B, C. Pero cuando la técnica espectroscópica se amplió a la medición de la intensidad de las rayas producidas por otros átomos además de los de hidrógeno, se consiguió una guía de temperaturas más precisa, y el orden alfabético tuvo que reorganizarse, con una nueva categoría. O. más caliente que A. añadida al principio De manera que hoy la escala de clases estelares, de más caliente a más fría, está ordenada así: O, B, A, F, G, K, M; podría parecer difícil de recordar, si no fuera porque a alguien se le ocurrió, hace ya mucho tiempo, asociarlo a las iniciales de «Oh, *Be A Fine Girl, Kiss* Me» («Oh, sé una buena chica y bésame»), lo cual una vez conocido ya no se olvida.

Esta escala de temperaturas va de unos 40.000°K para las estrellas O, hasta 3.000°K para las M[20]; se conocen también

[20] Las temperaturas dadas en °K son prácticamente las mismas que en °C cuando se trata de temperaturas tan altas; cero Kelvin es el cero absoluto de temperatura en la cual cesa toda actividad de moléculas y átomos. Esto equivale a –273°C, pero la diferencia entre 40.000 grados y 40.273 es prácticamente nula, de modo que podría muy bien decirse que las estrellas O tienen unas temperaturas de superficie de 40.000°C. Pero la diferencia es más importante a temperaturas más bajas y, una vez nos situamos en las condiciones de la Tierra, una diferencia de temperatura de 273°C es absolutamente decisiva

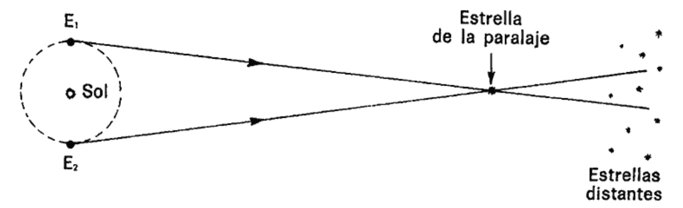
estrellas más frías, pero esto abarca la gama principal de los tipos espectrales. Nuestro Sol es una estrella de tipo G, con un espectro en el que predominan líneas de calcio ionizado y metales neutros (no ionizados). Al igual que las demás categorías, la clase G está subdividida en diez subclases numeradas de 0 a 9, y el Sol se describe, más precisamente, como una estrella G2, a un quinto del camino entre G0 y K0, en términos de temperatura y espectro, si bien no hay ninguna evidencia de que las estrellas evolucionen a lo largo de esta "secuencia" de clasificaciones del espectro estelar. La temperatura de la superficie del Sol, al igual que la de otras estrellas G2, es de unos 6.000°K.

En términos de color, las estrellas van del azul hasta el rojo, pasando por el blanco y el amarillo. Esto también puede explicarse en términos de temperatura, puesto que las estrellas más calientes emiten la mayor parte de su radiación en el extremo azul del espectro, mientras que las más frías radian su energía en el extremo rojo. Nuestro Sol es una estrella amarilla, y su radiación se sitúa aproximadamente en el centro de la banda de luz visible. Esto no es ninguna coincidencia; hemos evolucionado durante miles de millones de años bajo la luz de una estrella G2, y nuestros ojos están tan adaptados a ello, que la luz del Sol ocupa el centro de la banda de luz que podemos ver. Si viviéramos en un planeta que girara alrededor de una estrella O o A, con toda seguridad tendríamos unos ojos sensibles a la luz azul, con un "espectro visible" que quizás abarcara el ultravioleta, y el amarillo y el rojo serían quizá tan invisibles como lo es para nosotros en la Tierra la radiación infrarroja. Por otro lado, unas criaturas que vivieran bajo la luz de una estrella K o M deberían tener unos "ojos" muy buenos para "ver" los infrarrojos, pero serían ciegos para la luz azul, todo ello en el supuesto de que la vida pudiera desarrollarse bajo la luz de cualquiera de los extremos. Pero, dado que no es ninguna coincidencia que nuestros ojos estén adaptados a la luz de la estrella

---

para la vida.

situada en el centro de nuestro Sistema Solar, puede que tampoco lo sea el que vivamos gracias a la luz de una estrella del tipo G. Como veremos en seguida, estas estrellas relativamente tranquilas, pero también de relativa larga vida, pueden constituir hogares ideales para el desarrollo de vida inteligente, en tanto que los planetas que circundan estrellas O y A en un extremo, o K y M en el otro, puede que sean mucho menos hospitalarios que el planeta Tierra.



La distancia de una estrella cercana puede determinarse mediante el método de la paralaje, midiendo el ángulo en que parece que la estrella se mueve cuando es observada desde puntos opuestos de la órbita terrestre alrededor del Sol.

Por lo tanto, la identificación de la temperatura de una estrella proporciona el primer auténtico “asidero” astronómico acerca de su naturaleza. La siguiente cuestión de importancia es la de las distancias de las estrellas, algo que no revelan directamente las mediciones de su temperatura o su brillo. Una estrella podría ser pequeña y caliente, pongamos por caso, y bastante cercana, o podría ser muy grande y caliente, y muy lejana, y aun así presentar el mismo aspecto para nosotros en términos de brillo y de espectro. Para una temperatura fija, si el tamaño de una estrella es el doble, su brillantez será el cuádruple. Así que al conocer este otro dato, la distancia, los astrónomos pueden tener una idea del tamaño de las estrellas, así como de la temperatura de su superficie. Ello, a su vez, da una importante indicación de la temperatura en el *centro* de estas estrellas, lugar donde se produce toda la energía que las mantiene calientes.

DISTANCIAS ESTELARES

El primer método para determinar las distancias estelares depende de la manera en que las estrellas más cercanas parecen desplazarse a través del campo de las estrellas más distantes al tiempo que la Tierra se desplaza en su órbita alrededor del Sol. Este efecto es exactamente el mismo que se produce con los postes de telégrafo cercanos vistos desde un coche o un tren en movimiento, que parece que se deslicen sobre el fondo de las montañas que hay detrás, o el que se produce con la Luna, que da la impresión de que nos sigue cuando vamos caminando mientras que las casas y los árboles cercanos parecen moverse con respecto a la Luna. La órbita de la Tierra alrededor del Sol tiene un diámetro de unos 300 millones de kilómetros, lo cual nos proporciona una línea de base para medir el efecto de paralaje; cuanto más cerca esté una estrella, mayor será el desplazamiento observado durante un año. De hecho, aunque los astrónomos hacen sus cálculos sobre un año, aprovechando por completo la línea de base de 300 millones de kilómetros, definen las mediciones que realizan de esta manera en términos del *radio* de la órbita de la Tierra, simplemente dividiendo el desplazamiento angular de una estrella cercana durante un año por dos. De esta forma, definen la unidad de distancia llamada parsec, mencionada en el primer capítulo, que es la distancia hasta una estrella imaginaria que presentara un desplazamiento de paralaje de dos segundos de arco en un año, o un segundo de arco sobre una línea de base de la longitud del radio de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. De hecho, no hay ninguna estrella tan próxima para presentar un desplazamiento de paralaje tan grande. La más cercana, *Próxima Centauri*, tiene una paralaje de 0,765 segundos de arco, y está a una distancia de unos 4¼ años luz (un parsec, recuérdese, equivale a unos 3,26 años luz). La estrella del polo norte, la Polar, está a unos 200 parsecs, casi 700 años luz, y esto significa que esta estrella debe de ser 10.000 veces más brillante que el Sol para que brille con tanta intensidad en el cielo nocturno de la Tierra.

La técnica de la paralaje, que implica mediciones increíblemente precisas de unos desplazamientos angulares mucho menores que los que puede detectar el ojo humano, puede usarse para determinar distancias de estrellas que se encuentran a unos 300 parsecs, o 1.000 años luz, lo cual comprende la gran mayoría de las estrellas que podemos ver a simple vista. Las distancias de estrellas más lejanas pueden obtenerse de diversas maneras. En primer lugar, existe otra técnica geométrica, el método del cúmulo en movimiento, que se basa en el hecho de que las estrellas que se mueven en grupo por el espacio da la impresión de que convergen en un punto; este sistema se basa en mediciones de fotografías tomadas a lo largo de muchos años, para obtener una indicación exacta de la velocidad con que se mueve el cúmulo a través de nuestra línea de mira. Cuando ambas técnicas geométricas se hayan utilizado hasta el límite de sus posibilidades, los astrónomos sabrán la distancia exacta de miles de estrellas conocidas, y de esta evidencia podrán obtener una buena idea de cómo son en realidad las estrellas brillantes de los diversos tipos espectrales. Puesto que cualquier estrella del mismo tipo espectral puede considerarse que tiene un brillo determinado y su brillo aparente indica su distancia. Además, algunos tipos de estrellas variables, las variables cefeidas y *RR Lyrae* en particular, presentan unas fluctuaciones muy regulares en su brillo, fluctuaciones que la observación de estrellas cercanas estudiadas geométricamente demuestran que están relacionadas con el brillo medio. Éstas y otras técnicas extienden por el espacio la "vara de medir" de los astrónomos, hasta los confines de nuestra Galaxia y más allá, hacia otras galaxias. Como ya he mencionado antes, estas técnicas son de importancia decisiva para los cosmólogos que estudian el comportamiento de las galaxias lejanas. Pero tendremos que pasarlo por alto aquí y volver a la cuestión de cómo el conocimiento de la temperatura y de la distancia es suficiente para descubrir los secretos de la evolución estelar.

Las mediciones de las distancias nos revelan el brillo real de una estrella; la espectroscopia nos revela la temperatura de su superficie. Al reunir los dos datos, es posible relacionar el

brillo con la temperatura en una especie de gráfico conocido como diagrama de Hertzsprung-Russell, por el danés Ejnar Hertzsprung y el norteamericano Henry Russell, que lo elaboraron, cada uno por su lado, a principios del siglo XX. Este diagrama muestra una franja ancha, en la que se encuentran la mayoría de las estrellas, que va desde la parte superior izquierda (que corresponde a estrellas muy calientes y muy brillantes) hasta la parte inferior derecha (que corresponde a las estrellas frías y de poco brillo). Adicionalmente, hay una “rama”, que parte de la serie principal y se extiende hacia la parte superior derecha del diagrama, y que corresponde a las estrellas brillantes pero frías, y un grupo en la parte inferior izquierda que representa las estrellas calientes poco brillantes. Todas esas características se pueden explicar por las leyes de la física, y la explicación constituye una guía valiosa de la manera en que cambian las estrellas al envejecer.

DURACION DE LA VIDA DE LAS ESTRELLAS

Si nos fijamos en la franja principal, parece evidente que las estrellas más calientes y brillantes son las que tienen mayor masa. Cuanta más masa tiene una estrella, más fuerte es el tirón hacia dentro de su propia gravedad, y mayor debe ser la energía creada en el núcleo de la estrella para soportarlo. Esto significa quemar “combustible” nuclear a un ritmo espectacular, que produce cantidades ingentes de energía y mantiene la superficie de la estrella caliente y brillante. Esta clase de estrellas sólo pueden tener una duración de vida relativamente corta en la serie principal, antes de que su combustible se agote y se produzcan cambios drásticos. En el otro extremo, las estrellas frías y con poco brillo son muy pequeñas, con una gravedad más débil, y con una modesta cantidad de energía en sus núcleos. Pueden existir sin cambios durante mucho tiempo. Y en el centro están unas estrellas como el Sol (y que incluyen al Sol), moderadas en cuanto a tamaño y grado de producción de energía, moderadamente calientes y no muy grandes. Las estrellas brillantes de la clase O pueden tener una masa cuarenta veces

(o más) la del Sol, pueden ser 500.000 veces más brillantes que el Sol y tener un tamaño (en términos de radio) dieciocho a veinte veces mayor que el del Sol.

Las estrellas poco brillantes de la clase M, por otro lado, pueden tener un brillo de sólo una decimosexta parte o menos que el del Sol, teniendo la mitad de masa que el Sol y apenas la mitad de radio que éste.

Fuera ya de la serie principal, las estrellas frías pero brillantes se identifican como estrellas gigantes, estrellas que son mucho más grandes que el Sol, de modo que si bien cada metro cuadrado de la superficie estelar brilla menos que cada metro cuadrado de la superficie del Sol, el efecto global es que produce más radiación. En contraste, las estrellas calientes pero poco brillantes son estrellas enanas, más pequeñas que el Sol pero en las que cada metro cuadrado brilla más que el área correspondiente de nuestro Sol. Resumiendo, toda la evidencia acumulada por toda una generación de astrónomos —y omitiendo la historia detallada de cómo obtuvieron tal evidencia y perfeccionaron sus teorías hasta ser las que tenemos hoy—, todas estas características, se explican en términos de la evolución de estrellas de masa diferente.

Cuando el Sol se formó a partir de una nube de gas que se colapsaba, era, sin lugar a dudas, grande y frío, por lo tanto inició su existencia en la región del diagrama de Hertzsprung-Russell situada encima y a la derecha de la serie principal. A medida que el Sol en formación se contraía, se hacía cada vez más caliente y brillante y se movía hacia la izquierda del diagrama, y el punto en el cual este "camino evolutivo" confluyó con la serie principal corresponde al momento en que se estableció un equilibrio entre el fuego nuclear del interior del Sol, que lo proveía de energía para sostenerlo contra la gravedad, y esta gravedad, que trataba de convertirlo en una bola todavía más compacta. El Sol permanecerá más o menos en este mismo punto de la serie principal, durante un total de unos 10.000 millones de años, de los cuales ya han pasado casi la mitad. La masa de una estrella es la que dicta el grado de calor que debe

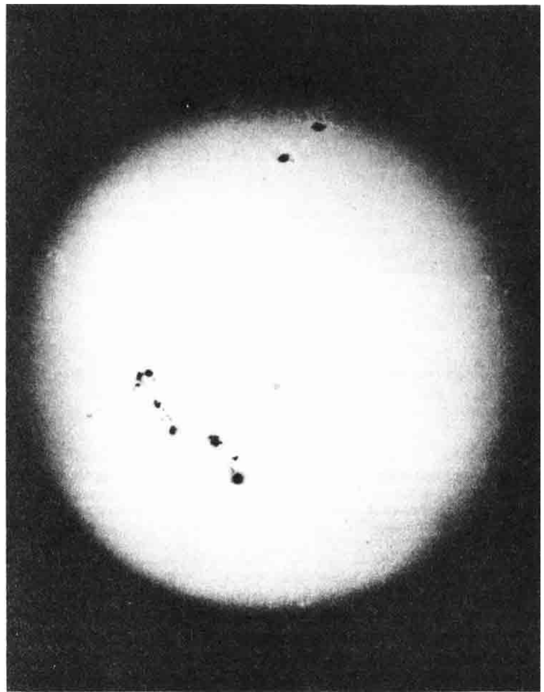
haber en su interior para resistir su propio empuje gravitacional, y ello determina la temperatura de la estrella y su brillo, de forma que a cada masa le corresponde un punto determinado en la serie principal. Una estrella con más masa, más compacta por su gravedad y correspondientemente más caliente, pasa su corta existencia de serie principal en la parte superior izquierda del diagrama de Hertzsprung- Russell. Y a pesar de que una estrella con veinte veces la masa del Sol tendrá veinte veces más de combustible nuclear para quemar, será 10.000 veces más brillante que el Sol, y consumirá todo su combustible en menos de 1.000 millones de años. La estrella Polar es de este tipo. Pero, aunque sea difícil creerlo, menos del 1% de las estrellas de nuestro entorno son más calientes que las de la clase F, de la serie alfabética, mientras que las estrellas tranquilas y de larga vida de la categoría M e inferiores constituyen el 75% de la población del disco de la Vía Láctea. Con este hecho surgen implicaciones interesantes para el acontecer de la vida en nuestra Galaxia y en todo el Universo, puesto que una estrella sólo durante su existencia en la serie principal muestra un comportamiento tranquilo y estable por un tiempo lo suficiente largo para hacer posible la vida inteligente en cualquiera de sus planetas. Aquí en la Tierra, donde parece que las condiciones son muy buenas para la vida (como veremos más adelante), sin embargo, se ha tardado más de 4.000 millones de años de existencia tranquila en la serie principal para que la vida inteligente apareciera[21]. Las estrellas O, B y A, fulgurantes y de breve existencia, no parece que sean, desde esta perspectiva, candidatas idóneas para centros de sistemas solares que contengan vida. Incluso la mayor parte de las estrellas de la categoría F mostrarían importantes cambios al cabo del tiempo que hemos tardado en desarrollamos aquí en la Tierra. Por otro lado, si bien las mortecinas estrellas M poseen una larga existencia, y

---

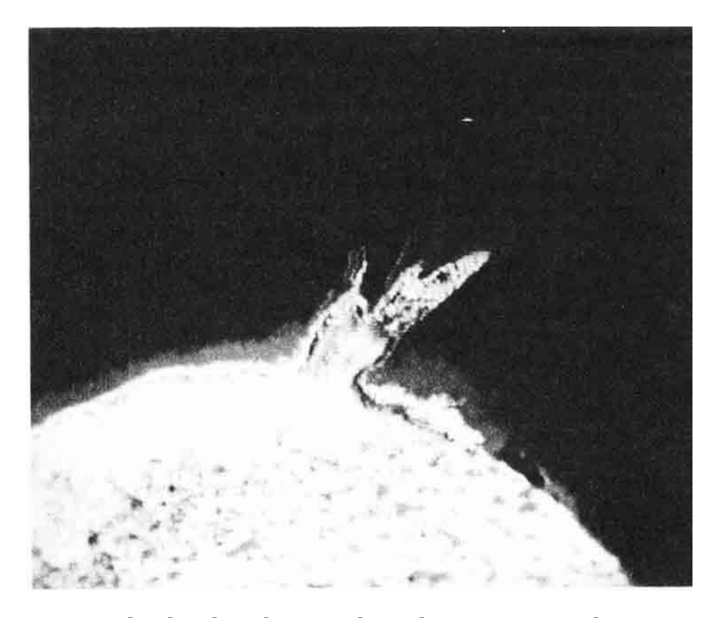
[21] El Sol puede que no haya sido *perfectamente* estable a lo largo de los pasados 4.500 millones de años, y sus pequeñas fluctuaciones es posible que hayan sido muy importantes para la vida en la Tierra. No obstante, teniendo en cuenta la clase de cambios producidos, puede considerarse que el Sol ha sido en realidad relativamente estable durante todo este tiempo.

dan mucho tiempo para que la vida se desarrolle en alguno de sus planetas, resulta que son unas fuentes de energía muy débiles, y la vida necesita mucha energía. Una estrella fría en el centro de un sistema planetario quizá nunca lograría proporcionar la suficiente cantidad de energía para que se desarrollara la vida tal y como nosotros la conocemos.

Al tratar de hacer generalizaciones sobre la naturaleza del Universo, y las probabilidades de encontrar vida en diferentes partes del Universo, los seres humanos tenemos que ser siempre cautos en asumir que la vida sólo puede ser “como nosotros la conocemos”. Esta clara evidencia del diagrama de Hertzsprung-Russell y la visión que nos da de la evolución estelar indica, no obstante, que no es ninguna coincidencia que la vida inteligente se haya desarrollado precisamente en un planeta de una estrella G2. Cuando esta historia de los orígenes de la humanidad en el Universo en evolución empieza ahora a acercarse a nuestro hogar, éste es un hito importante en el camino que tenemos delante. Parece ahora cada vez más que la vida “como nosotros la conocemos” no es ni un acontecimiento caprichoso en el Universo ni simplemente una variedad entre muchas, sino más bien el producto inevitable de la clase de Universo en el cual vivimos. Y este enfoque sugiere que las estrellas más adecuadas para el desarrollo de la vida son las que mantienen un equilibrio entre una emisión suficiente de energía para alimentar la vida y una duración larga para dar ocasión a que ésta evolucione. Este equilibrio ocurre en el centro de la serie principal, y sólo con reconocer la necesidad de una transacción entre longevidad y energía, la búsqueda de vida debe centrarse en los planetas de las estrellas G2. Por lo que conocemos hasta ahora, no hay nada de especial en el Sol como estrella de tipo G2, ni tampoco en su familia de planetas. Esto sugiere que puede haber muy bien numerosos planetas como el nuestro, muchos de ellos ricos en vida más o menos “tal como la conocemos”, aunque seguramente con más diferencias respecto a nosotros que las que nos separan de un cangrejo o un canguro.



Nuestro Sol es una estrella ordinaria, nada espectacular, pero lejos de hallarse completamente quieta. Manchas negras aparecen y desaparecen en su superficie con una periodicidad de unos once años, y la fotografía A (tomada por Paul Roques del Griffith Observatory) muestra un grupo de manchas solares perceptibles a simple vista el día 8 de abril de 1980. Cuando el Sol se halla más "manchado", se muestra más activo en otros aspectos, produciendo grandes explosiones resplandecientes, como la que se muestra en esta fotografía (*Abajo*) tomada por el *Skylab* de la NASA. Para formarse una idea del tamaño relativo, recuérdese que el diámetro del Sol es 109 veces mayor que el de la Tierra. *(Fotografía de la NASA.)*



Cuando el Sol acabe su vida en la serie principal, experimentará muchos cambios. Estos no tendrán lugar antes de 5.000 millones de años, y podría parecer poco relevante para la historia de los orígenes de la humanidad. Pero otras estrellas —especialmente estrellas de más masa— han seguido los mismos pasos, y gracias a ellas nosotros hoy existimos. El origen y la vida del Sistema Solar dependen de la muerte de estrellas que han existido anteriormente, y para comprender esto, necesitamos comprender, por lo menos en líneas generales, el proceso que tiene lugar en el interior de las estrellas para generar su energía.

MUERTE DE LAS ESTRELLAS

La energía estelar procede de reacciones nucleares: la fusión de núcleos atómicos en las calientes regiones centrales de las estrellas. Como en la primigenia bola de fuego del *Big Bang*, pero a una escala mucho menos dramática, el material

del interior de una estrella está ionizado por completo, con núcleos cargados positivamente y electrones negativos que constituyen un mar de partículas llamado plasma. En su origen, el calor del interior de una estrella procede de la energía gravitacional de la nube de gas que se colapsa de la que se formó la estrella; pero una vez la temperatura es lo bastante alta, los núcleos ligeros se fusionan literalmente y forman los núcleos de elementos más pesados. Durante el proceso, una pequeña cantidad de masa se convierte en energía, que mantiene la olla hirviendo y estabiliza la estrella contra una contracción posterior, en tanto dura el combustible. Dado que la mayor parte de la materia de la nube de gas originaria era hidrógeno primario, el proceso se inicia con la fusión de los núcleos de hidrógeno (simples protones) para formar núcleos de helio. En estrellas como el Sol, este proceso tiene lugar a través de interacciones directas protón-protón, que producen núcleos estables de helio-4 (cada uno de los cuales contiene dos protones y dos neutrones) a partir de unas interacciones que implican cuatro protones y la liberación de dos positrones (las contrapartidas positivas de los electrones). El efecto global, que convierte cuatro núcleos de hidrógeno en uno de helio, tiene lugar todo el tiempo, y producir la energía actual del Sol requiere la conversión de 600 millones de toneladas de hidrógeno en helio cada segundo[22].

---

[22] De hecho, cabe dentro de lo posible que el Sol no se mantenga ya, en la actualidad, por combustión nuclear. Diversos descubrimientos sugieren que algo raro está pasando en el interior del Sol y que quizá haya estado sucediendo durante unos cuantos millones de años y con certeza unos miles. Una pista clave procede de los intentos de detectar unas partículas llamadas neutrinos, que deberían producirse en grandes cantidades si prosiguiera el proceso de fusión nuclear en el Sol, como predice la teoría. Sólo se ha detectado un tercio del flujo esperado de neutrinos, y la explicación más sencilla es que la combustión nuclear se ha "apagado" temporalmente. Esto viene confirmado por el espectacular descubrimiento, realizados por Jack Eddy a partir de estudios de observaciones que se remontan a cien años o más, de que el Sol, en la actualidad, puede estar experimentando una lenta contracción. Esto es exactamente lo que esperaríamos de una estrella si su proceso de combustión nuclear se detuviera: la estrella empieza a colapsarse bajo la gravedad, pero mantiene su brillo al convertirse en calor su energía gravitacional. Esta situación, este

Sabemos lo caliente que debe estar el centro del Sol por la cantidad de energía que escapa de la superficie y por las leyes de la física, que nos indican la cantidad de energía necesaria para "mantener" una estrella de una masa solar. En el caso del Sol, la temperatura interna está cerca de los 15 millones de °K, y el proceso de combustión nuclear está dominado por la cadena protón-protón. Las estrellas mayores, con temperaturas centrales superiores a los 15 millones de °K, se mantienen calientes, principalmente, por otro proceso, el ciclo carbón-nitrógeno-oxígeno, el cual implica interacciones de todos esos núcleos así como hidrógeno y helio, pero que tiene el mismo efecto neto de convertir núcleos de hidrógeno en núcleos de helio y de liberar energía. Los problemas —y el final de la respetabilidad sosegada de la serie principal— sobrevienen cuando a las estrellas ya no les queda hidrógeno para transformar en helio en su centro.

Cuando esto sucede, todavía queda algo de hidrógeno en las capas más exteriores de la estrella, de modo que al principio la combustión del hidrógeno empieza a extenderse hacia el exterior formando una cáscara que envuelve el núcleo central, compuesto casi por completo de núcleos de helio. El núcleo de la estrella se contrae y se hace cada vez más caliente, en tanto que se libera la energía de la gravedad, mientras las capas exteriores de la estrella se hinchan debido a la mayor temperatura del centro, y hacen que la estrella se convierta en una gigante roja en la parte superior derecha de la serie principal del diagrama de Hertzsprung-Russell. Cuando nuestro Sol alcance dicho estadio, será mil veces más brillante que ahora, y con un

---

"tipo" de Sol, podría prolongarse por unos 100.000 años sin que afectara de manera grave las condiciones de la Tierra y comparado con la escala de tiempo de la existencia del Sol en la serie principal (10.000 millones de años), en realidad no es más que un "soplo".
Sin embargo, una alteración de esta clase, aunque sea pequeña, podría acarrear profundas implicaciones para la vida humana. Éstas se discuten con detalle en mi libro *The Death of the Sun* (Nueva York, Delacorte. 1980), en el que también se explican más detalladamente las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar dentro de las estrellas cuando mueren.

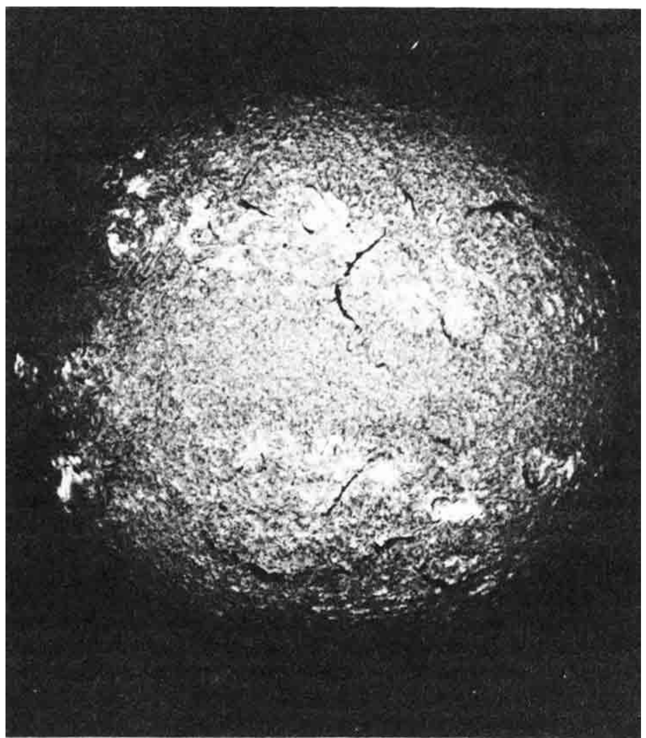
radio 100 veces mayor, y sumergirá por completo la Tierra. Pero de todas formas habrá muchos avisos para que el que viva dentro de 5.000 millones de años se dé cuenta. La expansión dura cientos de millones de años; pero con el tiempo, después de esa fase de su vida, tendrán lugar cambios mucho más excitantes dentro de la estrella.

Lo que suceda después depende de la masa de la estrella. Para el caso de una masa inferior a masas solares, la parte central, compacta y cada vez más caliente, de helio llega de repente a una fase en que tiene una temperatura lo suficiente alta para que los núcleos de helio se fusionen en núcleos de elementos más pesados, y se inicie de manera explosiva la “combustión” de helio en una fase de evolución conocida con el nombre de “destello de helio”[23]. Después del destello, la estrella vuelve de nuevo a la calma, con un núcleo que quema helio rodeado todavía por una envoltura que quema hidrógeno. Las estrellas más masivas, no obstante, logran el cambio sin pasar por el destello de helio, al adaptarse más gradualmente a la combinación de combustión de hidrógeno y helio que domina la producción de energía de casi todas las estrellas rojas gigantes visibles en el cielo. En el centro de combustión de helio de dichas estrellas, las temperaturas alcanzan los 100 millones de °K y el helio se transforma en carbono y oxígeno.

Para algunas estrellas, éste es el final de la historia. Cuando el hidrógeno y el helio se han agotado, la estrella simplemente se enfría y se contrae en una bola pequeña y fría, una mortecina estrella enana en la parte inferior izquierda del diagrama de Hertzsprung- Russell. Una tal enana blanca (que con el tiempo se enfría más y se convierte en una enana negra) puede tener tanta masa como el Sol, pero con el tamaño de la Tierra, y ya

[23] Todo esto lo sabemos no sólo por la observación, sino por una combinación entre observación y teoría. Diferentes clases de estrellas sólo pueden existir como se observan si su interior tiene cierta temperatura y cierta presión; leyes físicas determinadas en la Tierra nos indican qué le sucede a la materia del interior de las estrellas a esas temperaturas y presiones, y los teóricos elaboran después con computadora los “modelos” matemáticos de lo que ocurrirá a continuación, y de qué manera las estrellas han llegado a tal situación.

no se mantiene por el calor de su interior, sino por la fuerza física de los núcleos atómicos apiñados en lo que se ha convertido en un enorme cristal de carbono con una capa superficial de hidrógeno y oxígeno, una pavesa apagada cubierta de hielo.



Un modo de mostrar la actividad solar consiste en tomar una fotografía usando solamente la luz emitida por el hidrógeno (luz "hidrógeno alfa"). Esta imagen, obtenida el 29 de mayo de 1968 por observadores de la Pennsylvania State University, muestra torbellinos blancos en las regiones donde pueden darse fulguraciones y los estrechos filamentos negros se hallan relacionados con las formaciones conocidas como prominencias. *(Fotografía cedida por la Pennsylvania State University.)*

Pero en el caso de las estrellas masivas, la fase de combustión de helio puede ser seguida por una nueva contracción del

núcleo, que eleva la temperatura del interior, y pasar a la "combustión" de carbón, de oxígeno o incluso de silicio. Una vieja y masiva estrella gigante puede contener hasta cinco capas de combustión nuclear, con la formación de hierro en su centro. Pero cuando este estadio de evolución ha sido completado y su centro de hierro se colapsa y se calienta, ha llegado al final de su camino. Para formar núcleos todavía más pesados a partir del hierro-56, hay que poner energía *de dentro,* fuera no se obtiene nada. En efecto, los núcleos muy masivos, como los del uranio y del plutonio, tienden a desintegrarse y liberan energía durante el proceso en que se fragmentan en núcleos más ligeros. Éste es el proceso de fisión de una bomba atómica. Por lo tanto, ¿de dónde provienen los elementos pesados, en el primer momento?

Aquí, el modelo de los teóricos es menos seguro. Los astrofísicos creen saber más o menos lo que ocurre, pero no saben explicar, por el momento, los detalles. Está claro que al colapsar el núcleo central de hierro y liberar energía gravitacional, tiene que producirse una gran explosión que destroza la estrella gigante, y se cree que la efusión de toda esta energía gravitacional es suficiente para crear elementos pesados, incluido el uranio. Aunque parte de la energía se utilice en reacciones nucleares de este tipo, queda la suficiente para producir los acontecimientos estelares más espectaculares del Universo, las supernovas. Durante un breve período de tiempo, una estrella que muere en una explosión de supernova, puede resplandecer con tanto brillo como todas las estrellas de la galaxia juntas, y esas explosiones ocurren una vez cada pocas décadas entre las estrellas de una galaxia como nuestra Vía Láctea. Ahora volvamos a la conexión entre muertes y nacimientos de estrellas, y recordemos que nuestro Sistema Solar parece haber sido creado por el efecto de compresión de una o más supernovas en una nube de gas en el espacio. Pero aún hay más en esta historia "fenixiana" de renacimientos.

Los restos de la explosión de la supernova se esparcen por una extensa zona del espacio y forman una nube de gas en expansión. Pero ese material es muy diferente del de la nube en

colapso de la cual se formó originariamente la estrella. La estrella, constituida al principio casi toda de hidrógeno y helio, ha formado, a lo largo de la existencia, una mezcla de todos los demás elementos conocidos, incluyendo los elementos pesados que se formaron literalmente en su agonía de muerte. Todos esos elementos —incluyendo carbono, oxígeno, hierro, uranio y todos los que conocemos en la Tierra— se esparcieron para enriquecer el medio interestelar, y eventualmente, para formar parte de nuevas nubes de gas, que, a su vez, llegan a comprimirse hasta el punto en que se colapsan y forman nuevamente estrellas y planetas. Literalmente, todo lo que hay en la Tierra, excepto el hidrógeno y el helio (y es muy probable que también una gran parte de estos elementos), se ha creado en el interior, por lo menos, de una estrella. Los átomos de nuestros cuerpos, de este libro, del suelo que pisamos y del aire que respiramos, todos han pasado por una caldera estelar. Y sin las precedentes generaciones de estrellas masivas y de supernovas, que hicieron explosión, yo no estaría ahora aquí escribiendo este libro, ni ustedes estarían ahí para poder leerlo.

Pero, por supuesto, no todo el material de una supernova que ha hecho explosión se recicla. La parte central del núcleo de hierro se comprime aún más mientras las capas exteriores de la estrella estallan y se dispersan, y el núcleo de hierro queda pomo un residuo en el centro de la nube de material en expansión. Éste puede llegar a tal extremo de compresión que incluso los núcleos atómicos, que sostienen a las estrellas enanas contra el tirón de la gravedad, son incapaces de resistirlo, y como si se pasara una película hacia atrás, queda destruida la complejidad de los núcleos pesados tan laboriosamente elaborados por fusión nuclear, y los núcleos atómicos se disuelven en un mar de neutrones. Al llegar a tal estado, todos los restos estelares se transforman en un núcleo atómico gigante, una estrella de neutrones. Si una estrella enana con tanta masa como nuestro Sol es tan grande como la Tierra, una estrella de neutrones con una masa solar puede ser tan pequeña como la isla de Manhattan (Nueva York).

Pero ni siquiera éste es del todo el final de la historia. Puesto que si los restos tienen más de un par de masas solares de material, ni aun la fuerza de los neutrones puede resistir el empuje de la gravedad. Después de una prolongada lucha, que ha durado desde que la nube de gas original comenzó a colapsarse, la gravedad, combatida por la fusión nuclear, y en un último intento con la explosión de supernova, triunfa al fin en su batalla con la materia y el residuo es comprimido hasta la total no existencia y deja tras de sí un agujero negro. Las estrellas de neutrones y los agujeros negros se cuentan entre los descubrimientos más interesantes de la astronomía moderna, y constituyen la fuente de energía de los objetos celestes energéticos, como los pulsars, las estrellas de rayos X y (a una escala mayor) los quasars y radiogalaxias. Pero todos estos objetos exóticos no guardan una relación discreta con la historia de los orígenes de la vida en la Tierra. Armados ahora con el conocimiento de la relación que existe entre la vida y la muerte de las estrellas masivas y el origen de nuestro propio Sol y nuestro Sistema Solar, podemos al fin llevar nuestra historia a la Tierra, y ver cómo se originó y evolucionó nuestro planeta hasta ser lo que es, un hogar para la vida.

IV. EL ORIGEN DE LA TIERRA

Lo más importante que conocemos sobre el origen de la Tierra es que nuestro planeta se formó al mismo tiempo que el Sol, con el resto del Sistema Solar, a partir de una nube de gas que se colapsaba en el espacio interestelar. Pero la historia que estamos siguiendo en este libro es de manera fundamental la historia del origen de la vida en la Tierra en general y de la vida humana en particular. Nuestra forma de vida requiere un planeta con una estrella como el Sol, que inevitablemente fue producto de una galaxia, que a su vez se formó a partir de las fluctuaciones de la bola de fuego en el Universo en expansión. En cada etapa de la historia, ha sido necesario enfocar una magnitud cada vez más pequeña, y ha llegado el momento de hacerlo de nuevo. Después de examinar con amplitud la formación del Sistema Solar entero, vamos a considerar ahora el origen de la Tierra *"tal como la conocemos*", como un hogar para la vida humana. Esto, más que examinar la Tierra entera, incluido su interior más profundo, significa estudiar en particular la piel de la Tierra, la corteza, los océanos y la atmósfera que proveen el hogar para la vida terrestre.

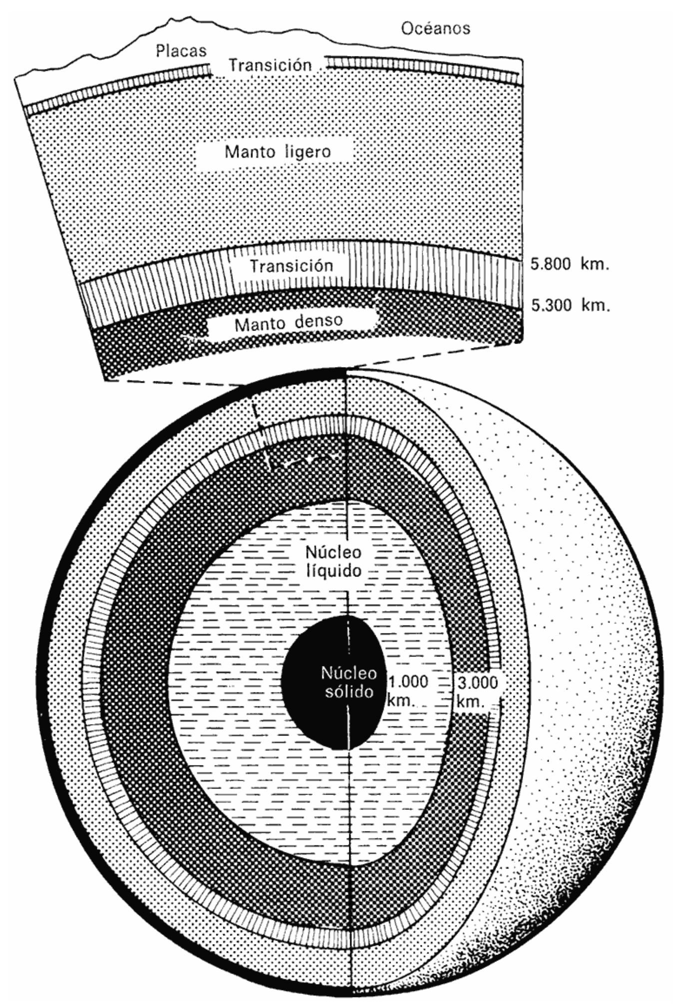
Esta concentración en la piel de la Tierra —llamada, a veces, biosfera— no sólo es apropiada sino obligada, puesto que, de hecho, muy poco se sabe de las particularidades del interior de la Tierra. A veces resulta más difícil descubrir qué ocurre en las profundidades bajo nuestros pies que lo que sucede en las partes más alejadas del Universo, ya que de éstas podemos por lo menos ver la luz que proviene de ellas. El bosquejo que sigue, acerca de lo que sabemos del interior de la Tierra y cómo se ha formado, es, por tanto, superficial, y las ideas que se describen son susceptibles de revisión a medida que aumenten nuestros conocimientos en las próximas décadas. Pero, con todo, y antes de dirigir nuestra atención a la corteza y la biosfera, se hace necesario decir algo sobre lo que hay debajo.

DENTRO DE LA TIERRA

La nube de polvo y gas en el interior del Sistema Solar y que al colapsarse formó el planeta Tierra estaba probablemente compuesta sobre todo de mezclas de silicatos, de óxidos de hierro y de óxidos de magnesio, con sólo indicios de los demás elementos químicos que ahora podemos encontrar en nuestro entorno terrestre. Estos restos representaban sólo una minúscula fracción del material más pesado que quedó en el del Sistema Solar interior, de donde fueron desalojados los elementos más ligeros por la actividad del Sol, cuando éste se formaba. La Tierra, durante su formación, se calentó debido a tres procesos diferentes. En primer lugar, se convirtió en calor la energía de movimiento (la energía cinética) de las partículas, a medida que éstas chocaban entre sí y se agrupaban. Esto prosiguió hasta mucho después de que el planeta adquiriera un tamaño respetable, cuando las "partículas" que entraban entonces en colisión eran grandes meteoritos que se estrellaban contra la superficie del planeta, cosa que de vez en cuando todavía sucede. Después, cuando su tamaño como planeta propiamente dicho empezó a aumentar debido a esta acreción, su interior recibió cada vez más presión por el peso creciente del material de encima. La proto-Tierra se calentó del mismo modo que se calienta una nube de gas o una estrella al contraerse y liberar energía gravitacional potencial en forma de calor. Pero, a diferencia de una nube de gas o de una estrella, el calor del interior no pudo escapar con facilidad al espacio, sino que quedó en gran parte atrapado por la sólida barrera de la corteza terrestre de encima, lo que ayudó a que el interior de la Tierra se mantuviera caliente hasta hoy. Y, en tercer lugar, algunos de los elementos de la mezcla de materiales pesados que constituyeron el núcleo del joven planeta eran radiactivos —los productos pesados de la supernova que puso las bases para el nacimiento del Sistema Solar— y desde entonces se han ido desintegrando, y han contribuido a mantener la temperatura de la Tierra con la energía creada por su fisión nuclear. El calor radiactivo se producía en grandes cantidades cuando la Tierra era

joven, pero desde entonces se han desintegrado muchísimos átomos, y quedan relativamente pocos para contribuir hoy a calentar la Tierra. Casi con toda seguridad, ese temprano calor radiactivo constituyó un importante factor en la fusión de la Tierra rica en hierro, quizás unos cientos de millones de años después de que el planeta empezara a formarse a partir de la nube de material que rodeaba el proto-Sol. Pero debido a que la temperatura de fusión de un sólido aumenta si éste se encuentra bajo presión, la fusión no se inició en el centro de la Tierra, sino entre 400 y 800 km de profundidad, donde la combinación de una presión ligeramente inferior a la del centro, pero con una temperatura claramente superior a la de la superficie, proporcionaba un equilibrio adecuado para ello.

La glóbulos de hierro fundidos así formados se habrían hundido entonces a través del material que les rodeaba hacia el centro de la Tierra, y habían cedido más energía gravitacional en forma de calor al proceso, que hacía que casi todo el interior estuviera en fusión. Una vez en esta fase, los elementos más pesados podían asentarse libremente en el interior más profundo, mientras que los elementos más ligeros podían flotar hacia la superficie. De forma que la Tierra empezó a acercarse a su estructura presente, con un interior en fusión y rico en hierro, y una capa superficial formada por material más ligero, donde predominaba el silicio. De la misma manera que la composición de la Tierra en conjunto no es típica de la composición de la nube de la cual nació el Sistema Solar, el material de la corteza sobre la cual vivimos no es típico del material que constituye la mayor parte de la Tierra. Pero en todas las etapas a lo largo del camino en que se produjo la separación de elementos, ha seguido claras leyes físicas. No hay nada de particular en la separación de elementos que condujo al medio ambiente actual de la superficie de la Tierra, y cualquier planeta que se formara de la misma manera terminaría en un estado muy similar. Nuestro medio ambiente terrestre es, en gran parte, producto del Universo en el que vivimos.



Estructura estratificada actual de la Tierra.

Así, la corteza de la Tierra contiene hoy sólo un 6% de hierro, en tanto que el planeta en conjunto contiene un 35%, mien-

tras que la corteza terrestre contiene un 28% de silicio, elemento que constituye sólo el 15% de la masa total del planeta. Algunos elementos pesados, tales como el uranio o el torio, nunca tuvieron la oportunidad de asentarse en el interior de la Tierra, porque se combinan fácilmente con elementos ligeros, como el oxígeno o el silicio, y constituyen compuestos ligeros (óxidos y silicatos) que flotaron hasta la superficie. Una consecuencia de esto es que después de la fusión inicial se produjo una gran cantidad de calor radiactivo en las capas superficiales, desde donde pudo fácilmente radiarse hacia el espacio. Una vez se formaron las capas superficiales de material ligero, y muy poco material caliente del interior subía a la superficie, el enfriamiento pudo producir la corteza sólida de la Tierra, que estableció más o menos el tipo actual de la superficie que hoy conocemos, pero sin la atmósfera y los océanos que hoy conocemos y, ciertamente, sin vida. En lugar de ello, a medida que la corteza se solidificaba, la superficie de la Tierra se cubría de rocas calientes y de una gran cantidad de volcanes activos, que vomitaban rocas fundidas (lava) y gases. Estos gases desempeñaron un papel decisivo en la evolución subsiguiente de la superficie de nuestro planeta, como pronto veremos. Pero puesto que fue en este estadio de enfriamiento y solidificación cuando se estableció la característica principal de la corteza, su división en continentes y en lo que serían cuencas oceánicas, veamos antes cómo se estabilizó la estructura de nuestro planeta, desde la corteza hasta su interior más profundo.

Los continentes están constituidos por rocas ligeras, sobre todo granito, mientras que el material de la corteza de debajo de los océanos, principalmente basalto, es algo más pesado, de modo que al final los materiales más ligeros se elevaron más que los densos, en conformidad con las leyes más simples de la física. Podemos incluso fechar cuándo ocurrió todo esto, ya que las rocas más antiguas que se conocen tienen una edad de 3.900 millones de años, y la edad del Sistema Solar es de unos 4.500 millones de años. Por lo tanto, tuvieron que transcurrir unos 600 millones de años, en números redondos, para que en la Proto-Tierra se desarrollara un interior caliente y en fusión,

tuviera lugar la "diferenciación" entre material ligero y pesado, y se iniciara la solidificación de la corteza, alrededor del 13% de la historia de nuestro planeta hasta ahora.

Lo que resultó de toda esta actividad fue un planeta dispuesto en capas, cada una de las cuales envolvía a las situadas más al interior. Y lo que hoy sabemos de esta disposición en capas es resultado del estudio de las ondas de los terremotos, que atraviesan la Tierra y que pueden ser observadas por medio de detectores sísmicos. Los sismólogos miden el tiempo que tardan las ondas de un terremoto en atravesar la Tierra y llegar a varios puntos diferentes de la misma, y esto les indica algo sobre la naturaleza del material del interior de la Tierra y que las ondas han atravesado. Pero con toda honestidad, hay que reconocer que elaborar un esquema de la estructura de la Tierra con sólo esta información tiene tanto de arte como de ciencia, y un eminente geofísico dijo que era como analizar la estructura de un piano con sólo oír el sonido que hacía al bajar rodando un tramo de escalera. No obstante, es notable lo mucho que los sismólogos han averiguado sobre la estructura de la Tierra.

Empezando desde la superficie, tenemos una bola rocosa con un radio medio de 6.371 km, ligeramente aplastada por los polos. La envoltura exterior, o corteza, constituye sólo el 0,6% del volumen total de nuestro planeta, y su grosor varía desde unos 5 km bastante uniformes debajo de los océanos hasta 35 km debajo de las superficies continentales llanas, y 80 km debajo de las grandes cordilleras como el Himalaya. Por lo menos sabemos algo de la corteza por la observación directa. Está constituida principalmente por silicio y aluminio, más oxígeno, combinados en diversos compuestos que forman rocas graníticas, lava solidificada y depósitos sedimentarios. El nombre que se da al material de la corteza continental es el de sial, formado por las primeras letras de silicio y aluminio; y debido a que la corteza de los océanos contiene también grandes cantidades de magnesio, se le denomina a veces sima.

Debajo de la corteza hay un cambio muy pronunciado en la estructura, marcado por una frontera llamada discontinuidad de

Mohorovičić (o simplemente Moho) por el sismólogo yugoslavo que fue el primero que la identificó. Debajo de ella se encuentra el manto, una capa que alcanza una profundidad de unos 2.900 km, y que constituye más del 82% del volumen de la Tierra. Parece que se compone de tres zonas, el manto superior, de unos 370 km de espesor, una zona de transición, de unos 600 km, y el manto inferior, de 1.900 km de espesor, pero poco se sabe de su composición química.

A más profundidad, encontramos el núcleo, dividido en núcleo exterior, de 2.100 km de espesor, y núcleo interior, de un radio de 1.370 km, que llega hasta el centro de la Tierra. Esta es la región que, según parece, está formada por hierro líquido, mezclado con algo más, probablemente azufre. Una de las consecuencias más importantes de la existencia de un núcleo de hierro fundido es el campo magnético que produce. Cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, se produce un flujo de corriente eléctrica, y esto es lo que debió de ocurrir al principio de la formación del Sistema Solar, cuando el entonces recién fundido núcleo de la Tierra estableció una interacción con campos magnéticos procedentes del Sol en formación. Una vez se establece así una corriente eléctrica, ésta produce sus propios campos magnéticos y el sistema alimentado por la energía de la rotación de la Tierra da como resultado una dinamo de acción automática, que ha permanecido hasta hoy. Esta característica de nuestro planeta es posible que haya desempeñado un papel muy importante en la historia de la vida, y nos ha proporcionado asimismo una prueba magnética muy útil, petrificada en las rocas de la corteza, de cómo han variado las capas desde que se solidificaron hace ahora unos 3.900 millones de años. Sin embargo, antes de llegar a esto, queda por describir todavía una importante sutileza acerca de las propias capas superficiales, y, por supuesto, la historia de la atmósfera y su evolución.

De la misma forma que existe una división básica de la Tierra en corteza, manto y núcleo, división que depende principalmente de la composición química, existen subdivisiones de las

capas superficiales que parecen depender simplemente de diferencias físicas (presión y temperatura) y no químicas. Desde 75 km de profundidad y hasta alrededor de 250 km, existe una capa que presenta una velocidad de onda sísmica ligeramente más baja que las capas inmediatas superior e inferior. No es del todo una capa líquida, sino una región más débil donde el manto está en parte fundido, como un cubo de hielo medio derretido. Es la llamada astenosfera, y se describe como un mar viscoso (quizás unas gachas espesas proporcionan una comparación mejor que el hielo en fusión) sobre el que flota la capa de corteza de encima, la litosfera. La capa sólida de debajo de la astenosfera —el resto del manto superior— se llama mesosfera. Y la presencia de la astenosfera es de suma importancia debido a lo que ha ocurrido en la superficie, la litosfera, en los últimos cientos de millones de años, dado que esta capa viscosa ha permitido que las rocas sólidas de encima se movieran desplazando los continentes por todo el globo y abriendo cuencas oceánicas en un lugar y cerrando océanos en otro. La astenosfera es, al mismo tiempo, la fuente de nuevo material de la corteza, en forma de magma, que sube a la superficie desde el interior.

Con la historia del desplazamiento de los continentes y del cambio de cuencas oceánicas, estamos casi listos para considerar el origen de la Tierra *del hombre,* la delgada piel de la biosfera donde la vida puede existir. La vida tal como la conocemos, sin embargo, no pudo establecerse hasta que estuvieron formados los océanos y se hubo creado la atmósfera. Y la vida en tierra no pudo establecerse hasta que se hubo modificado la atmósfera —con la ayuda de la vida en el mar— y se convirtió en una mezcla rica en oxígeno que mantiene la respiración y la vida de los animales, incluidos los animales humanos. El último paso para que la Tierra se convirtiera en un hogar para la vida fue el desarrollo del aire que respiramos. Para explicar esto, el origen de la atmósfera, sería útil retroceder un poco y comparar lo que sucedía en la Tierra al principio de la historia del Sistema Solar con lo que ocurría en los planetas, Venus y Marte.

EL AIRE QUE RESPIRAMOS

Por fin hemos llegado a la etapa en que trataremos del entorno ambiental directo de la vida tal como la conocemos. ¿Acaso la vida —incluso la vida inteligente— es algo que aparece casi inevitablemente en los planetas que están a la "correcta" distancia de la estrella de la cual dependen y que contienen los ingredientes químicos "correctos"? ¿O bien la vida es una especie de azar cósmico, que apareció sólo ocasionalmente, quizás una sola vez? Hasta que encontremos vida en otro planeta no podremos responder de manera definitiva a estas preguntas. Pero sí sabemos que la vida se estableció de manera muy firme en un planeta, en éste. Y aquí en la Tierra, el éxito de la vida parece estar íntimamente relacionado con una gran abundancia de agua líquida (obsérvese que el término que utilizamos para un lugar donde no hay vida, desierto, es el que utilizamos también para indicar que no hay agua). Acabamos de ver que planetas como la Tierra, Venus y Marte son consecuencia inevitable del proceso por el que se forman las estrellas, siempre que al fragmentarse la nube preestelar dé origen a una estrella más una familia de planetas, y no a un sistema múltiple[24]. Si ahora llegamos a la razonable suposición de que la vida requiere un planeta húmedo, cada uno de los demás factores —temperatura, composición química y otros— será automáticamente tomado en cuenta a la hora de crear las condiciones físicas necesarias para la existencia de grandes cantidades

---

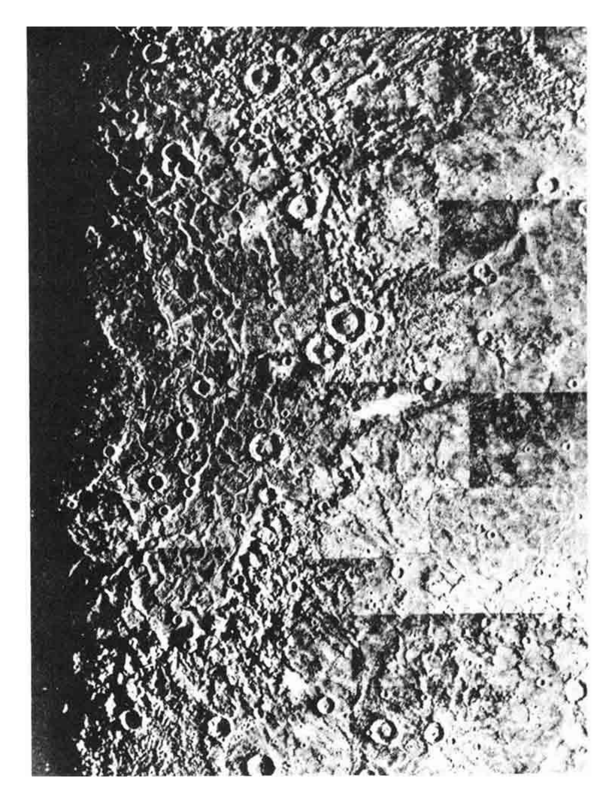
[24] Ésta es una *condición* importante. Sólo alrededor de un 15% de las estrellas del disco de nuestra Vía Láctea no están acompañadas por otra u otras estrellas que constituyen un sistema múltiple y cuyos miembros describen órbitas alrededor de su centro común de masa. Es difícil comprender cómo los planetas de un sistema así pueden ser muy adecuados para la vida, incluso en el supuesto de que pudieran mantenerse en una órbita estable bajo la atracción constantemente variable de la gravedad ejercida por dos o más "soles", puesto que habría mucha probabilidad de que existieran variaciones extremas de la temperatura, al haber diversos focos en el sistema que proporcionarían calor en períodos diferentes. Por lo tanto, lo más prudente es considerar que sólo el 15% de las estrelléis de la Vía Láctea podrían tener planetas como el nuestro, pero que el 15% de varios miles de millones aún deja muchos lugares posibles para la vida.

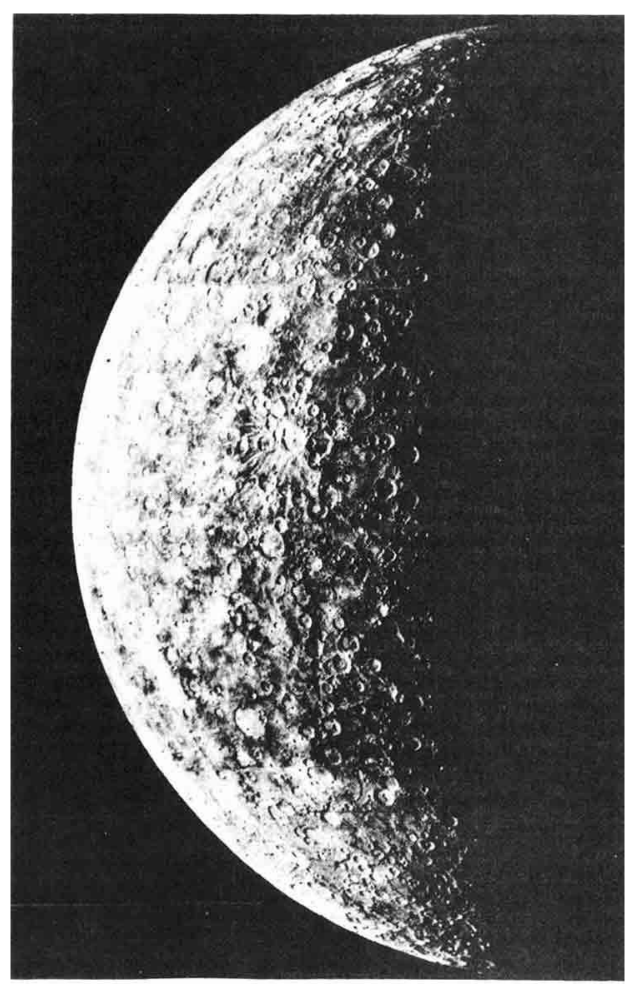
de agua líquida. Dejando aparte por completo la cuestión de la vida en alguna forma desconocida para nosotros (y hay que decir que algunos astrónomos han especulado seriamente con la posibilidad de formas de vida flotante en la atmósfera de Júpiter), la respuesta a si somos o no el producto azaroso de unas raras condiciones astronómicas depende de si nuestro planeta es o no el producto azaroso de unas raras condiciones astronómicas, algo que se puede determinar simplemente con ver las razones que hacen que nuestros vecinos cercanos, Venus y Marte, no hayan logrado convertirse en planetas húmedos.

Venus y Marte, al igual que la Tierra, son planetas pequeños y rocosos, como corresponde a los planetas de la parte interior del Sistema Solar. La naturaleza de la atmósfera y de los océanos de esta clase de planetas pequeños y rocosos depende sólo de una cosa: el exacto equilibrio de temperatura de la superficie rocosa, que está relacionado con la distancia al centro del Sol.

Venus, el planeta casi gemelo de la Tierra en muchos aspectos, tiene un grueso manto de atmósfera, rica en dióxido de carbono y rodeada de nubes de ácido sulfúrico, que atrapa el calor solar por el llamado efecto de invernadero y eleva la temperatura de la superficie hasta 500°C, muy por encima del punto de ebullición del agua; Marte, por otro lado, tiene una tenue atmósfera de dióxido de carbono, con sólo un pequeño efecto de invernadero para ayudar a calentarla, y una temperatura superficial demasiado baja para que el agua esté en estado líquido o para que caiga en forma de lluvia. La Tierra es el único planeta de los tres que tiene la atmósfera adecuada para mantener la superficie a la temperatura justa, entre el punto en que se hiela el agua y el punto de ebullición de la misma. En cada caso, el "medio ambiente" presente ha evolucionado a partir del material gaseoso liberado del interior de los tres planetas —cualquier atmósfera inicial (quizá dominada por metano y amoniaco) debió de ser dispersada por las fluctuaciones erráticas del Sol a medida que pasaba una situación de combustión nuclear estable, dejando que los desnudos planetas ro-

cosos elaboraran su propia atmósfera mediante desprendimientos gaseosos, incluidas la actividad volcánica y la vaporización de materiales de superficie cuando los grandes meteoritos chocaban contra ella.





La cara acribillada de Mercurio, vista aquí en fotografías tomadas por la nave espacial *Mariner 10* de la NASA, muestra con mayor claridad que cualquier otro objeto del Sistema Solar cómo los planetas se han formado por la acreción de masas de materia de menor tamaño que colisionan, se adhieren y originan masas de tamaño planetario.



Vista desde el espacio, como en esta fotografía tomada por el METEOSAT, la Tierra es notablemente distinta de los otros planetas interiores del Sistema Solar, con nubes de vapor de agua en la atmósfera y océanos de agua alrededor de los continentes.

La comprensión de los orígenes de la atmósfera de la Tierra es algo aún bastante nuevo. Se solía creer que cuando la Tierra estaba consolidándose, unos 4.000 millones de años atrás, tenía

una atmósfera original a base de metano, amoniaco y compuestos parecidos, muy semejante a las atmósferas actuales de los planetas gigantes. Esta idea estaba relacionada con la búsqueda de los orígenes de la vida, puesto que los experimentos de laboratorio, a mediados del siglo XX, habían demostrado que cuando unos gases como el metano y el amoniaco se mezclaban con agua en un tubo, y se hacían pasar chispas eléctricas o radiaciones ultravioletas a través del tubo, podrían formarse unas moléculas que se consideraba que eran las precursoras de la vida. La Tierra, en sus comienzos, estaba sin duda bañada de rayos ultravioletas procedentes del Sol, y la atmósfera primitiva probablemente estaba llena de chispas en forma de relámpagos, así que se conjeturó que también debían de contener metano y amoniaco para que se iniciara la vida.

Pero más recientemente, otros experimentos han demostrado que las moléculas prebióticas también pueden elaborarse en "atmósferas" de tubo de ensayo ricas en dióxido de carbono, lo cual eliminó la necesidad de una atmósfera de metano y amoniaco en la Tierra primitiva. Algunos astrónomos, como veremos en el capítulo siguiente, llegan a argumentar que en las nubes interestelares se encuentran presentes avanzados precursores de la vida, o incluso moléculas vivas, y que podrían "sembrar" un planeta nuevo, aunque esta opinión extrema no tiene el apoyo franco de todo el mundo. De todas maneras, está claro que una atmósfera de dióxido de carbono más agua es una buena condición para el nacimiento de la vida en la Tierra. Este descubrimiento es importante, puesto que el desprendimiento de gases volcánicos en la Tierra actual produce abundante dióxido de carbono y agua, más suficiente nitrógeno, en diversos compuestos, para haber constituido este componente principal de la atmósfera después de que se formara la Tierra sólida. Y, dado que no hay razón para pensar que los procesos de desprendimiento de gases han cambiado mucho desde que la Tierra se formó, cabe esperar, por lo tanto, que todos los planetas rocosos desarrollan unas atmósferas ricas en dióxido de carbono y agua. Mercurio, por supuesto, está tan cerca del Sol que todo intento de crear una atmósfera es frustrado por el calor;

pero Venus y Marte tienen ambos atmósferas de dióxido de carbono, lo cual está muy de acuerdo con las ideas actuales acerca de cómo se formaron éstas. Sin embargo, Venus y Marte parecen haber perdido el agua, mientras que la Tierra ha perdido el dióxido de carbono (o, mejor dicho, lo ha transformado en otras cosas). Estas diferencias se explican claramente por las distintas distancias que separan del Sol cada uno de los tres planetas.

Casi lo único que nos puede indicar la física simple acerca de la superficie de un planeta rocoso, desprovisto de atmósfera, situado a una distancia determinada del Sol, es su temperatura. Y eso es todo lo que necesitamos saber para determinar si un planeta rocoso es húmedo o seco. La temperatura de equilibrio de un cuerpo rocoso que describe órbitas alrededor del Sol depende de la cantidad de calor que le llega de éste (lo cual depende de la distancia) y de la cantidad irradiada al espacio (que depende de la temperatura de las rocas por encima del cero absoluto, en °K). En la medida en que las rocas de los tres planetas tengan la misma composición, que sí la tienen, la temperatura de equilibrio depende de la raíz cuadrada de la distancia del Sol, de forma que Marte, 1,52 veces (como promedio) más lejos del Sol que la Tierra, tendría una temperatura 1,234 veces más baja la de la Tierra, si ninguno de los dos planetas tuviera atmósfera[25].

En el caso de Venus, la temperatura estable resultante del balance térmico entre el calor solar entrante y el calor infrarrojo saliente, irradiado por las rocas, era de 87°C (360°K) antes de que se iniciaran los desprendimientos gaseosos. En estas condiciones, tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua liberados por estos desprendimientos permanecieron en estado gaseoso y formaron un manto alrededor del planeta. Y tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua son muy idóneos para atrapar la radiación infrarroja, por lo que la temperatura de la superficie de Venus se vio forzada a subir hasta alcanzar

[25] Por razones obvias, este factor de 1,234 es una de esas cosas inútiles que siempre se memorizan.

un nuevo equilibrio, muy por encima del punto de ebullición del agua, y se fueron estableciendo así las condiciones que encontramos hoy en el planeta.

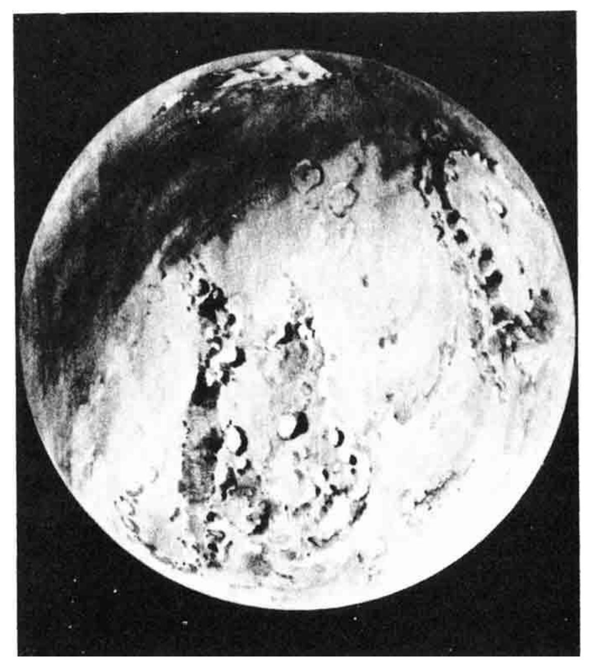
En Marte, las cosas fueron muy diferentes. Con una temperatura de equilibrio original de 30° bajo cero en la escala de Celsius (243°K), e agua ni siquiera podía derretirse, y menos evaporarse, y aunque se formó una tenue atmósfera de dióxido de carbono que sí contribuye con un modesto efecto de invernadero, ello no es suficiente para hacer de Marte un planeta húmedo en la actualidad.

Pero por muy poco: Marte está en el mismo borde de ser un planeta húmedo, y probablemente podía haberse desarrollado mucho más como la Tierra si sólo hubiera tenido algo más de masa, dado que su atracción gravitacional extra le hubiera ayudado a mantener una atmósfera de dióxido de carbono de más espesor para que proporcionara el calentamiento esencial por efecto de invernadero. Las fotografías de Marte realizadas por las naves *Mariner* y *Viking,* que muestran muchas características que parecen haber sido moldeadas por el flujo de algún líquido, incluyendo cauces secos de ríos, sugieren a algunos astrónomos que Marte sí tuvo, realmente, hace mucho tiempo, una atmósfera más densa y agua corriente, y que el estado frío y seco actual se desarrolló a medida que este manto de aire que le daba calor escapó poco a poco al espacio. Sabemos que los ríos, si es que son ríos, no pueden ser características nuevas porque la superficie de Marte está llena de hoyos y marcas de cráteres de meteoritos. Algunos de esos cráteres se superponen a los lechos de los ríos, lo cual revela que se produjeron después de que el agua dejara de correr por ellos. Y puesto que tenemos una buena idea de la cantidad de meteoritos que chocan contra Marte (o mejor dicho, de lo poco que lo hacen), es sencillo calcular que los cauces de los ríos han estado secos desde hace mil millones de años o más, y quizá durante la mitad de la vida del Sistema Solar.

El florecimiento de Marte debió de ser un período muy corto, durante la primera juventud del planeta. Es posible, no obstante, que el planeta pueda volver a ser húmedo otra vez,

puesto que si los casquetes polares se descongelaran, contribuirían con agua y dióxido de carbono a hacer más densa su atmósfera. Un meteorito gigante podría chocar contra su superficie y hacer el trabajo; o unos sutiles cambios en la órbita de Marte alrededor del Sol podrían hacer variar sus estaciones y calentar los polos; o, quizá, dentro de cientos de años nuestros descendientes de la Tierra consigan que Marte sea habitable para el hombre. Pero lo importante, en términos de probabilidades de encontrar vida en otra parte, no es, sin embargo, que Marte fracasara en el intento de ser un planeta húmedo, sino que estuvo muy cerca de conseguirlo.

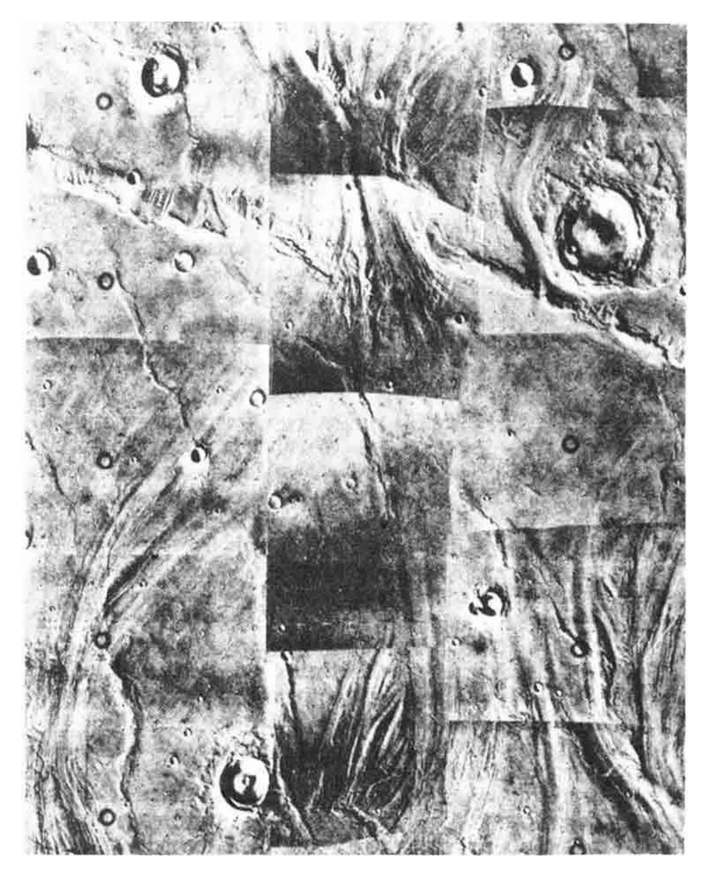




Aunque Venus se halla cubierto por nubes (que contienen ácido sulfúrico), la nave espacial *Pioneer* de la NASA, en órbita alrededor de Venus, ha trazado mapas de la superficie mediante radar y los artistas han podido dibujar imágenes del aspecto que ofrecería la superficie del planeta sin las nubes que lo cubren. Los mapas obtenidos mediante radar muestran que, como la Tierra, Venus está dividido en regiones continentales (en su caso, en tres continentes principales) y en llanuras deprimidas que ocupan la mayor parte de la superficie del planeta, como el fondo marino de la Tierra si no estuviera oculto por el mar. Las medidas son incluso suficientemente exactas como para identificar grandes valles en forma de fisuras sobre Venus, y todo esto induce a pensar en un planeta cuya "geofísica" es muy similar a la de la Tierra, con tectónica de placas, deriva continental y expansión del "fondo marino". Las diferencias entre la Tierra y Venus residen en buena medida en sus envolturas, en una diferente atmósfera de Venus debida a su posición ligeramente más próxima al Sol y que posibilita el desarrollo de un efecto invernadero de un modo desproporcionado. *(Fotografías de la NASA.)*



La superficie actual de Marte presenta el aspecto de un árido desierto, como muestran las fotografías tomadas por el módulo del *Viking* que se posó sobre ella. Pero las fotografías tomadas en vuelo orbital sugieren que en algún momento fluyó agua por la superficie marciana. Todo indica que el planeta no pudo disponer de una atmósfera lo bastante espesa como para mantener un cálido efecto de invernadero y conservar su agua en estado líquido, y que, en realidad, los canales fluviales son muy antiguos. Si Marte hubiera sido un poco mayor o hubiera estado algo más cerca del Sol, o éste hubiera sido más cálido, en nuestro Sistema Solar existirían dos planetas, Tierra y Marte, aptos para la vida tal como la conocemos. *(Fotografías de la NASA.)*



En la Tierra, la temperatura original de la superficie era de unos 27°C (300°K, lo cual es 1,234×243), o, en números redondos, 25°C, ya que, para ser honestos, ninguno de estos cálculos es exacto y tanto da un par de grados más o menos. Esta temperatura era lo suficiente alta para que el agua líquida fluyera, pero no tanto para que enormes cantidades de vapor de agua pasaran a la atmósfera y ayudaran al dióxido de carbono a producir un holgado efecto de invernadero. Bien al contrario: las aguas calientes de los océanos en crecimiento disolvieron

dióxido de carbono procedente de la atmósfera y redujeron el efecto de invernadero, mientras que las blancas nubes de agua que flotaban en la nueva atmósfera reflejaban calor del Sol e inclinaban el equilibrio de la temperatura hacia un ligero enfriamiento. El resultado fue que la temperatura de la superficie de la Tierra con atmósfera se estableció en una media de unos 15°C, donde ha permanecido desde entonces. Los dos factores de equilibrio, poder de reflexión (albedo) y *efecto* de invernadero, actúan incluso como una especie de termostato que mantiene la temperatura de la superficie de la Tierra dentro de un margen moderadamente estrecho, tal como indica un simple "experimento" imaginario.

IMPLICACIONES PARA LA VIDA

Supongamos que la Tierra se calentara un poco, cosa que podría suceder si el propio Sol también se calentara algo. La primera cosa que sucedería sería la evaporación de más agua de los océanos, que formaría más nubes en el cielo, que a su vez bloquearían más calor del Sol y ayudarían a minimizar el efecto de calentamiento. O supongamos que el Sol se enfriara. Con menos evaporación habría menos nubes en el cielo y llegaría al suelo una proporción mayor del calor entrante. De modo que el escenario estaba preparado para la aparición de la vida: un planeta húmedo con una atmósfera estable, que mantenía la temperatura dentro de sus estrechos límites, de manera que el planeta ni se helara por completo ni se achicharrara. Con los conocimientos actuales (incluyendo aquellos experimentos de hacer pasar chispas eléctricas a través de botellas llenas de agua y dióxido de carbono) es difícil imaginar que la vida no lograra establecerse en un planeta así, y de aquí en adelante, la historia de la evolución de la atmósfera de la Tierra está indisolublemente ligada a la historia de la vida en la Tierra. Muy brevemente, aunque la radiación ultravioleta del Sol mantuviera estéril el suelo, incluso después de la creación de los océanos, la vida podía desarrollarse bajo la protección de los

mares. Las primeras formas de vida encontraron el oxígeno venenoso, un producto peligroso del cual tenían que librarse. Pero hace unos dos mil millones de años, el oxígeno empezó a producirse en la atmósfera, donde las reacciones químicas, estimuladas por la radiación del Sol (reacciones fotoquímicas), produjeron una capa de ozono (la forma triatómica del oxígeno) que bloqueó los esterilizadores rayos ultravioletas solares. Bajo este filtro protector, la vida pudo desplazarse del mar a la tierra, a la vez que se habrían desarrollado nuevas formas de ella que medraban en el oxígeno. Los primeros productores de oxígeno dejaron de existir debido a su propia contaminación, en tanto que sus descendientes se adaptaron a respirar dióxido de carbono las plantas y oxígeno los animales. Esto significó un nuevo equilibrio, en el que la propia vida era parte de la "realimentación", y la Tierra pasó a ser reconocida como un planeta vivo.

Mucha gente interpreta la historia, tal como la he contado, como una indicación de que la vida puede que sea algo muy raro. Argumentan que no se ha demostrado que exista vida en Marte o Venus, y que la Tierra ha tenido mucha suerte al escapar de la doble trampa de un invernadero desmedido y del desierto helado. Nuestro planeta se encuentra casi en el punto medio de la banda de órbitas alrededor del Sol donde la superficie de los planetas rocosos tiene la temperatura correcta para poder formar una atmósfera estable con agua corriente y océanos; Venus está demasiado cerca del Sol y Marte demasiado lejos. Con una órbita ligeramente diferente, dicen, nosotros también nos helaríamos o nos achicharraríamos.

Pero, si la Tierra *estuviera* en una órbita diferente, ¿dejaría ello nuestra presente órbita vacía? Si nuestro planeta estuviera en la órbita de Marte, entonces Venus podría haber estado en la nuestra, y se habría desarrollado de la misma manera en que se desarrolló la Tierra. Un planeta de la masa de la Tierra en la órbita de Marte podría retener suficiente atmósfera para mantenerse caliente y húmedo por el efecto de invernadero, y nuestro Sol estaría rodeado por dos planetas con vida, y no por uno solo. Naturalmente, los planetas no pueden moverse de órbita

en órbita, y, como hemos visto, hay buenas razones por las que Marte es más ligero y pequeño que la Tierra. Pero consideremos la situación desde otro punto de vista.

Supongamos que el Sol fuera sólo un poco más caliente. Nuestro planeta Tierra se encontraría todavía en la zona de vida, aunque entonces la zona también incluiría a Marte; con una estrella central algo más fría, tanto la Tierra como Venus serían húmedos, aunque Marte se helara totalmente. En mi opinión, diría que somos desafortunados por tener sólo un planeta húmedo en este Sistema Solar. Y éste es un cambio muy importante en la forma de ver las cosas. Sabemos, por las evidencias de la espectroscopia, que las estrellas aisladas (el 15% que no forma parte de sistemas múltiples) tienen invariablemente una rotación lenta, como el Sol. Esto significa que han tenido que ceder momento angular, casi con toda seguridad en la formación de sistemas planetarios como el nuestro. Sabemos, por la física descrita en capítulos anteriores, que los planetas rocosos, “terrestres”, deben formarse en las partes interiores de dichos sistemas, con los gigantes gaseosos situados más lejos. Y sabemos, tal como demuestra la falta de vida en Marte y la presencia de ésta en la Tierra, que la banda de las órbitas alrededor de una estrella como el Sol en las que es posible la vida cubre una porción de espacio lo suficiente amplio para que sea virtualmente seguro que abarque un planeta y con buenas probabilidades de abarcar dos.

Los pesimistas que dicen que si la Tierra estuviera más cerca del Sol se achicharraría y que si estuviera más lejos se congelaría resultan muy lúgubres. En cualquier lugar hasta Marte y hasta medio camino a Venus nuestro planeta sería igualmente húmedo y habitable. El aire que respiramos y los océanos que nos rodean no son fenómenos raros del Universo, sino complementos inevitables de un planeta rocoso situado a una distancia tal de la estrella materna que la temperatura de equilibrio de la superficie, antes de que se formara la atmósfera por desprendimientos gaseosos, estaba como mínimo unos grados por encima del punto de congelación del agua, y no era lo

suficiente alta para que el agua liberada por los desprendimientos gaseosos permaneciera en estado de vapor en la atmósfera. Este margen es lo suficiente estrecho para hacer improbable que cualquier planeta en *particular* sea húmedo, pero lo suficiente amplio para asegurar que un planeta entre varios, en un sistema como el Sistema Solar, sea húmedo. Los pesimistas son en realidad chauvinistas de la Tierra; por supuesto que nos importa el que la Tierra viva o muera, pero en términos de vida en el Universo, podrían haber sido perfectamente Venus o Marte los que ganaran la lotería en nuestro Sistema Solar.

Las estrellas como nuestro Sol, en efecto, pueden constituir un buen lugar para la creación de la vida. Las más masivas, como ya hemos visto, pasan por sus ciclos de existencia muy rápidamente, y la vida ha necesitado miles de millones de años para evolucionar en la Tierra y convertirse en vida inteligente. Las más frías, en cambio, tienen una existencia más larga que el Sol, pero sus zonas de vida son más estrechas, con lo cual decrece la posibilidad de que algún planeta esté en la órbita correcta para llegar a ser húmedo. En realidad, puede que la existencia de vida en otros planetas, que rodean otros soles, sea no sólo posible sino probable; si es así, hay muy buenas probabilidades de que sea bajo un cielo azul, con nubes blancas y un sol amarillo, con ríos y océanos de agua en abundancia.

LA CORTEZA DESLIZANTE

Sin embargo, antes de que veamos cómo la vida se estableció en nuestro planeta, todavía queda un aspecto de la cambiante Tierra que es necesario examinar. La Tierra donde la vida se desarrolló, e incluso los continentes que albergaron la vida animal al principio, era muy diferente de la Tierra actual en un aspecto que es, en cierto modo, superficial, pero sería perceptible de inmediato si algún astronauta que viajara en el tiempo pudiera traemos una fotografía de la Tierra vista desde el espacio hace mil millones de años. Si bien ya era entonces un planeta húmedo, salpicado de continentes, éstos y los océa-

nos no siempre han presentado la misma distribución. La deriva continental, la formación de las montañas y otros procesos geofísicos han cambiado repetidamente la faz de la Tierra, y a menudo con importantes consecuencias para la vida. Los terremotos, los volcanes, así como el flujo y reflujo de las épocas glaciales, están relacionados con dichos cambios, y constituyen las características principales que se han combinado para formar el entorno que hoy es nuestro hábitat.

Hace tan sólo veinte años, el concepto de la deriva de los continentes, es su reencarnación en forma de la moderna teoría de las “placas tectónicas”, estuvo a punto de revolucionar nuestra comprensión de la Tierra. Hoy día, aunque unos pocos objetores de la deriva de los continentes alcen todavía su voz de vez en cuando en los círculos científicos, el concepto está tan establecido que para la actual generación de geógrafos y geofísicos es natural y de sentido común, tan obvio como la gravedad una vez que el genial Isaac Newton nos la revelara a nosotros, los pequeños mortales. En la historia de cómo se impuso la idea de que los sólidos continentes se mueven por el globo debajo de nuestros propios pies es imposible, sin embargo, nombrar a un genio cuyo trabajo haya convencido a todos los científicos. El hombre que para muchos es el “padre” del concepto es Alfred Wegener, un astrónomo alemán que se pasó a la meteorología, que publicó su versión de la idea en el ya lejano 1912, y con más detalle en 1915. Pero las evidencias más convincentes no llegaron hasta los años sesenta, gracias a la combinación de nuevas técnicas para el estudio de la naturaleza de la corteza terrestre, en especial de la corteza debajo de los océanos, y de los computadores electrónicos de alta velocidad para analizar las observaciones. Hasta los años cincuenta, en efecto, pocos geólogos veían la Tierra como algo no totalmente estable. Los continentes podían elevarse o hundirse un poco como respuesta a la suma o resta del peso de los hielos, en el vaivén de los períodos glaciales, pero no podían, según se creía, cambiar sus posiciones en la superficie de la Tierra. Se consideraba que los fondos de los océanos eran mucho más antiguos que las rocas de los continentes, y que la mayor parte de

ellos no habían cambiado desde que la Tierra se formó. Todas esas ideas han experimentado una transformación, excepto la que postulaba que el flujo y reflujo de los hielos provoca desplazamientos verticales en la corteza.

Sabemos ahora que los fondos oceánicos constituyen los aspectos más jóvenes de la corteza, y que toda la delgada corteza que hay bajo los mares se recicla de continuo en el interior de la Tierra, de modo que las rocas más viejas del lecho del mar no tienen más de 200 millones de años, comparado con los 4.500 millones que tiene el planeta. Los continentes no sólo contienen las rocas más viejas, sino que también se han ido moviendo por la superficie de la Tierra, transportados por los mismos procesos que reciclan la corteza del lecho de los mares, durante un largo período de tiempo. Y este conocimiento combinado del comportamiento de los continentes y del reciclaje de la corteza debajo del mar es lo que hace que la moderna teoría de las placas tectónicas sea mucho más sólida que las primeras teorías de la deriva de los continentes.

Según la leyenda, una de las primeras personas que se dieron cuenta de la similitud de formas entre la costa este de América del Sur y la costa oeste de África fue Francis Bacon, en 1620. No parece que Bacon llegara a sugerir que la razón de que los dos continentes encajaran como una pieza de un rompecabezas era que en alguna época habían estado unidos y que en determinado momento se separaron; pero el descubrimiento se convirtió en una fuente de inspiración para los patrocinadores de la deriva de los continentes a lo largo de los siglos. En 1858, el americano Antonio Snider desarrolló una versión del concepto, que relacionó con el diluvio bíblico, en la que sugería que se había hundido una única masa original de tierra y las aguas del diluvio se habían precipitado en la grieta entre el Viejo Mundo y el Nuevo; otros científicos del siglo XIX especularon con versiones de la idea, que comprendían teorías según las cuales la Luna había sido arrancada de la cuenca del Pacífico, pero la versión de Wegener de principios del siglo

XX fue la primera teoría de esta clase verdaderamente completa, que recurría a las evidencias de diferentes disciplinas científicas para establecer una tesis firme.



La perfecta coaptación de los continentes de ambos lados del Atlántico, no a nivel de las actuales líneas de la costa sino de los bordes de la plataforma continental, proporciona una de las más llamativas indicaciones del modo en que derivaron los continentes.

La tesis no fue aceptada en su momento, ni durante medio siglo más, y una razón de ello parece haber sido el hecho de que Wegener fuera un intruso. Un astrónomo convertido en

meteorólogo no era, a los ojos del *establishment* geológico de su tiempo, alguien que pudiera tomarse muy en serio, y su situación de intruso contribuyó a que la disputa científica sobre la deriva de los continentes fuera a menudo áspera durante unas décadas. Todo ello, no obstante, ya ha pasado, y con la acumulación de nuevos testimonios, la idea de la deriva de los continentes de Wegener se encuentra tan bien fundamentada como cualquier otra de la ciencia de hoy.

El ajuste como en un rompecabezas de los continentes, incluyendo América del Sur y África, es tan impresionante como siempre, pero constituye hoy una de las evidencias menos decisivas en favor de la deriva de los continentes. Al reconstruir la imagen de cómo los actuales continentes pueden reunirse en un supercontinente, los geofísicos no utilizan ahora el contorno detallado de los continentes a nivel del mar, sino el contorno de la plataforma continental, que marca la frontera entre la gruesa corteza del continente y la más delgada del fondo marino. Ésta es la frontera natural que hay que escoger, pero, por supuesto, sólo pudo escogerse una vez fue descubierta, después de las mediciones modernas que revelaron lo delgada que realmente es la corteza oceánica. Con las fronteras continentales ya definidas (y utilizando las modernas computadoras para acelerar la tarea de encontrar el "mejor" encaje de las piezas del rompecabezas, si bien el trabajo puede hacerse a mano, utilizando recortes de las siluetas de los continentes uniéndolos sobre una esfera), se encuentra que el encaje entre América del Sur y África es casi perfecto, y los demás continentes encajan con claridad para formar dos supercontinentes: "Laurasia", en el hemisferio norte, y "Gondwanaland", en el hemisferio sur.

Una segunda línea de acción respalda la evidencia de que los actuales continentes estaban unidos así hace sólo 180 millones de años. El hecho de que las piezas encajen no demuestra que alguna vez estuvieran unidas: en términos legales, la evidencia es sólo circunstancial. Pero cuando se encuentran características geológicas que coinciden al unir los dos continentes, entonces la evidencia se hace mucho más sólida. Si imagina-

mos que las piezas del rompecabezas son recortes de un periódico, y después estas piezas se han juntado de modo que las formas geométricas coincidan, es como si encontráramos que las líneas escritas de la pieza llamada, por ejemplo, "América del Sur", coincidieran con las líneas escritas de "África", de modo que pudiera leerse la noticia y que las dos piezas juntas formaran la hoja del periódico antes separada en dos trozos. Muchas de esas "líneas" geológicas pueden "leerse" a través de las junturas de los supercontinentes de Laurasia y Gondwanaland, y sólo es necesario destacar aquí unos pocos ejemplos. En primer lugar, las rocas antiguas de un lado de la juntura coinciden con las antiguas del otro lado; en segundo lugar, la forma de erosión debida a las capas de hielo, al viento y al agua es la misma en las rocas de ambos lados y revela que, por ejemplo, el sudeste de Brasil y el sudoeste de África estaban unidos hace entre 550 y 100 millones de años, y luego, gradualmente se separaron[26]; y finalmente, la deriva de los continentes explica por qué se encuentran restos de arrecifes de coral (formados en aguas tropicales) y depósitos de carbón (restos de selvas tropicales) en latitudes tan altas como Europa[27].

La teoría de Wegener consideraba que los continentes se movían por la corteza más débil del fondo oceánico, un poco como los icebergs se mueven por el agua del mar. Si bien la versión moderna de las placas tectónicas considera que las cor-

---

[26] Los efectos de la erosión en diferentes épocas del pasado se determinan por la observación de los diferentes estratos de rocas y sedimentos. De manera gradual, los depósitos más nuevos los encontramos en la superficie del suelo y los más antiguos sucesivamente debajo de éstos. Aunque esta disposición simple se distorsionase al abombarse las rocas bajo las fuerzas implicadas en la deriva de los continentes, los estratos que corresponden a las diversas épocas pueden todavía identificarse y detectarse con precisión mediante el empleo de diversas técnicas, entre ellas la medición de la desintegración radiactiva de cientos de isótopos.

[27] La redistribución de los continentes por deriva también explica muchos otros aspectos de la distribución de restos fósiles en las rocas de diferentes partes del mundo: el "registro fósil". Seguiremos con el tema en seguida, al tratar de los efectos de la cambiante distribución de los continentes en la vida.

tezas tanto del océano como de los continentes se mueven juntas, excepto en los bordes de las placas, la teoría de Wegener requería la existencia de dos clases diferentes de corteza en la Tierra, una piel delgada, que formaba los fondos marinos, y una corteza más gruesa y más estable, que formaba los continentes. Y en este aspecto, aunque no estaba del todo en lo cierto, apuntaba en la dirección correcta. No es nada fácil imaginar que la "sólida" corteza de los fondos oceánicos se abra para dar paso a los continentes, pero hay muchas sustancias que tienen un comportamiento plástico que permite esa clase de deformación. La propia roca, bajo las condiciones adecuadas, experimenta deformaciones plásticas, como lo demuestra la presencia de grandes cordilleras de arrugas más pequeñas en la piel de la Tierra; en términos más domésticos, la "masilla tonta" (*silly putty*), que encanta a los niños de todas las edades, es otro ejemplo de ello. Esta masilla es una sustancia elástica que, apelotonada en forma de bola, muestra un extraordinario poder de rebote, y que, estirada en forma de lámina delgada, si se deja en una pendiente, fluye muy lentamente cuesta abajo. Pero, si se da a la bola un golpe seco con un martillo, se hace añicos como un pedazo de vidrio. Una roca "sólida", sometida a una constante presión durante millones de años, puede deformarse plásticamente, y sólo nos parece que su forma es constante y no cambia, porque la vida humana es demasiado corta comparada con la de un continente o la de una cordillera. Las sacudidas y vibraciones de la actividad volcánica y sísmica son indicaciones harto dramáticas en términos humanos, de estos lentos procesos que cambian sin cesar la faz de la Tierra y reordenan la disposición de los continentes.

Durante los años cincuenta, unos estudios sísmicos mostraron que la corteza de la Tierra es realmente más delgada debajo de los océanos que en los continentes, con un grosor medio que oscila entre 5 y 7 km frente a la media de 34 km de la corteza continental (que a veces puede llegar a 80 o incluso 90 km de grosor debajo de las grandes montañas). Esto no confirmaba, sin embargo, que la idea de Wegener de que los continentes se

movían *a través* de la corteza oceánica era correcta. Las mismas técnicas de estudio que descubrieron la delgadez de la corteza oceánica revelaban también que la superficie de la corteza debajo del mar está esculpida de una manera tan desigual como la superficie de cualquier masa de tierra, con montañas y cañones submarinos, fosas profundísimas en algunas partes del mundo y, lo más significativo de todo, un gran sistema de dorsales (elevaciones del fondo oceánico en forma de cordilleras) que se extiende por todo el mundo, con ramales en todos los océanos. El ramal de este sistema que se extiende por el Atlántico Norte fue pronto estudiado con detenimiento, y desde entonces ha sido aceptado como el arquetipo de las dorsales oceánicas. Se eleva unos 3 km por encima de las planicies del fondo del mar, y constituye una región geológica muy activa, donde son comunes la actividad volcánica submarina y otros fenómenos subterráneos; esta actividad se hace patente en Islandia, donde la dorsal emerge a la superficie del mar en forma de esta pequeña isla, volcánica y geológicamente activa.

DERIVA CONTINENTAL Y EXPANSIÓN DEL FONDO MARINO

En 1960, este sistema de dorsales y su actividad fueron explicados por el profesor Harry Hess, de la Universidad de Princeton, en términos de expansión del fondo del mar, con lo que reavivó la idea de la deriva continental y la estableció al fin sobre una base sólida. De acuerdo con la nueva versión de esa vieja idea, el material del interior de la Tierra, en algunas partes del mundo, fluye hacia arriba por convección, agrietando la corteza y empujando la roca fundida a través de las grietas, las cuales crecen hasta convertirse en el sistema de dorsales oceánicas. La delgada capa producida por la solidificación de la roca es empujada continuamente al exterior de la dorsal, expandiéndose a ambos lados de la misma de tal forma que hace crecer el suelo del océano. Esta idea explica por qué encajan los bordes de los dos continentes a uno y otro lado del Atlántico, pues al tiempo que se separan las grietas de un continente

mayor y más antiguo —fenómeno que ha venido sucediendo durante un período de 200 millones de años—, la actividad de las dorsales en expansión del Atlántico ha ensanchado el océano que queda entre ambos lados. En este caso, el ensanchamiento se produce a razón de 2 cm por año (expandiéndose a razón de 1 cm por año a cada lado de la dorsal central).

Todo este proceso se considera "superficial" en relación con lo que es la Tierra. La corteza que se mueve, se agrieta y es empujada por medio de la convección, es simplemente la litosfera, una piel no más gruesa, comparada con la Tierra entera, que la piel de una manzana, comparada con la manzana entera. Y la región bajo la litosfera, en la cual tiene lugar la convección, es la astenosfera, sólo parcialmente fundida, entre 75 y 250 km por debajo de la superficie misma. Toda la actividad relacionada con la deriva continental se da en los primeros 250 km de la superficie, ayudada por el calor que escapa del interior, y provoca las corrientes de convección. Fuera de un radio de 6.371 km, esto representa el 4% de la parte externa de nuestro planeta. Si esta expansión fuera el único proceso importante que ha provocado el movimiento continental, estaría entonces claro que nuestro planeta podría aumentar constantemente de tamaño para acomodar toda su nueva corteza. Pero al mismo tiempo que la formación del gran sistema de dorsales oceánicas se estaba produciendo, los geógrafos descubrían la existencia de profundas fosas oceánicas, que unen la parte oeste del Pacífico desde Nueva Zelanda hasta las Filipinas, y desde el Japón hasta las Aleutianas, y, en la parte este del Pacífico, desde Chile a México. Hess ha sugerido que la nueva corteza de océano creada con la expansión se ha equilibrado con la destrucción de la relativamente antigua corteza oceánica en esas profundas fosas, donde las estribaciones descendentes de las células en convección barren la, en cierto modo, delgada corteza oceánica bajo la más gruesa corteza de una masa continental hacia la astenosfera, donde se funde, y en la cual el

material puede ser reciclado en otra —o la misma— ramificación del sistema de dorsales expansivas[28].

Este sencillo modelo hizo encajar en su lugar las piezas que representan el nuevo mundo. La continua actividad volcánica y gaseosa del sistema de dorsales oceánicas ayudó a explicar de dónde procede el agua de todos los océanos; mientras, la idea de una corteza oceánica activa, incesantemente reciclada, y una más resistente corteza continental dieron una nueva perspectiva de la actividad geológica de la Tierra, desde la que se esclarece por qué la acción principal, en términos geológicos, tiene lugar en un determinado sitio. Y la evidencia definitiva que confirmó con exactitud la expansión del fondo marino llegó a principios de los años sesenta, cuando los geofísicos comenzaron a medir y estudiar los modelos de magnetismo de las rocas de ese fondo.

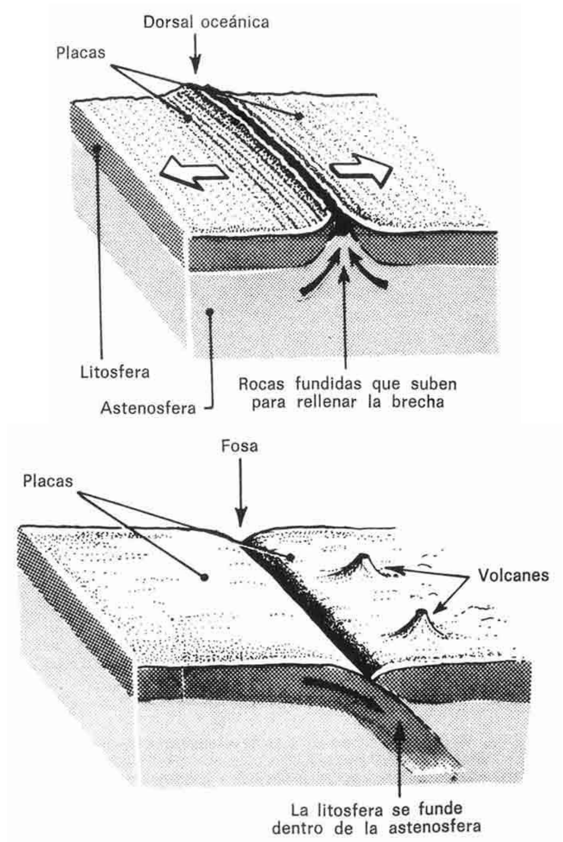
Las rocas del fondo marino son, de modo fundamental, basaltos ligeramente magnéticos. Cuando el basalto fundido sale de una dorsal oceánica y se desparrama hacia ambos lados, se enfría rápidamente y, tan pronto como entra en contacto con el agua del mar, se solidifica; mientras esto sucede, queda magnetizado y alineado con el campo magnético de la Tierra. No

[28] Existen respetables geólogos que argumentan que la Tierra se ha expandido un poco desde que se formó como planeta sólido, mientras que otros sostienen que se ha hecho algo más pequeña. No obstante, se opina, en general, que no se está produciendo actualmente ningún cambio de tamaño importante, y se descarta, por supuesto, que se pueda considerar seria la teoría según la cual la expansión fuera de tal magnitud que permitiera la creación del océano Atlántico en tan sólo 200 millones de años. Aparte de otras consideraciones, una expansión tan acelerada hubiera modificado tanto el radio de la Tierra durante los últimos 200 millones de años que el "rompecabezas" que forman los continentes no se podría montar de nuevo en el globo terráqueo, al haberse éstos separado cuando la esfericidad de la Tierra era mucho menor. La controversia que pudiera haber sobre los cambios de tamaño de la Tierra, a largo plazo y de poca relevancia (o sobre cambios importantes pero ocurridos hace muchos años) carece de sentido ante el hecho de que en la época actual —lo cual significa para los geólogos, durante los últimos cien millones de años— el tamaño de la Tierra se mantiene prácticamente constante, y de que la deriva de los continentes se produjo en un globo terráqueo del mismo tamaño que el actual.

obstante, una vez ha concluido el proceso, en términos magnéticos, la roca se convierte en una especie de imán, y, si se rompe y se le cambia de dirección, se orienta según el resto de la roca y no según el campo magnético de la Tierra. Donde los estratos de roca han sido depositados uno sobre el otro, debido a una continua actividad volcánica, el efecto antes mencionado puede observarse claramente en los sucesivos estratos, porque el campo magnético de la Tierra no es constante. La orientación de los polos magnéticos se desplaza en relación con los polos geográficos y, además, por razones todavía lejos de estar aclaradas, el campo entero "salta" de vez en cuando, con lo que los polos norte y sur intercambian sus posiciones. Así pues, el grupo de estratos de basalto de un continente puede tener un estrato superficial alineado con el actual campo magnético de la Tierra, otro estrato o estratos alineados de forma algo diferente, que se equiparan a los polos magnéticos del pasado más inmediato, y, por último, estratos con una polaridad totalmente invertida, correspondientes a los tiempos del pasado geológico más lejano, cuando el campo de la Tierra estaba orientado al revés de como lo está ahora.

Cuando la observación magnética del fondo marino en diferentes partes del mundo mostró marcas o líneas de modelos magnéticos dispuestas de norte a sur, junto con otras adyacentes de polaridad magnética opuesta, no fue difícil para los geofísicos de mediados de los años sesenta hallar una explicación basada en la idea de la expansión del fondo del mar. Dicho de manera rápida: cuando, en un momento determinado, el basalto sale de la dorsal oceánica, se deposita con la marca del campo magnético de ese momento. Cuando el campo se invierte, el nuevo basalto quedará depositado con la marca del nuevo campo magnético, al lado del basalto anterior, que se habrá ido apartando de la dorsal expansiva. En la medida en que este proceso se repite una y otra vez a lo largo de cientos de millones de años o más, queda construido un modelo de marcas magnéticas, distribuidas de forma simétrica alrededor de la dorsal, en la cual cada marca o línea puede ser datada por comparación

con los modelos magnéticos encontrados en rocas de distintas épocas.

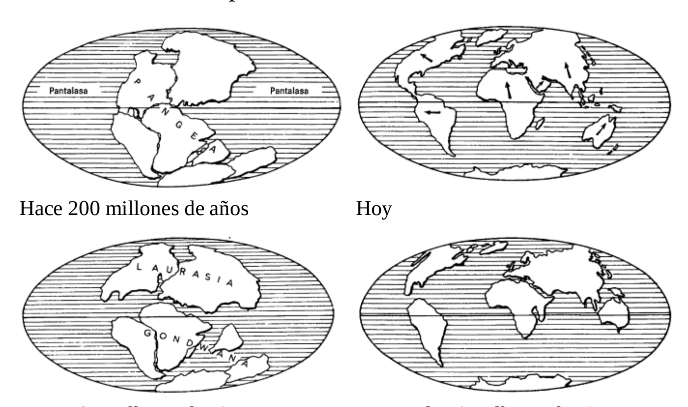


La causa de la deriva continental está en la expansión del fondo marino. A nivel de las dorsales, que son roturas de la delgada corteza del fondo marino, se depositan nuevas rocas a medida que material fundido emerge y se desparrama a uno y otro lado de la dorsal. El ensanchamiento del fondo marino resultante se equilibra justo donde la delgada corteza oceánica es forzada a introducirse debajo de la corteza más espesa de una masa continental, originando una fosa en el borde del continente y constriñéndolo a formar montañas y volcanes.

El concepto es de una brillante sencillez, si bien dichas observaciones están todavía lejos de dejarlo todo tan transparente como, al explicarlo yo, he hecho que pareciera. El resultado es claro: la idea de la expansión del fondo del mar declara lo que le ocurre a la corteza oceánica, la nueva corteza se forma en las dorsales oceánicas para desaparecer luego en la garganta de las fosas oceánicas, creando una especie de cinta transportadora, en la cual la corteza continental se ve conducida. Entre la dorsal en expansión y la fosa oceánica hay una región que disfruta de una relativa estabilidad, una "placa" de la corteza de la Tierra. Tales placas pueden rozarse entre sí, con una corteza que ni se crea ni se destruye dentro de sus límites; se presentan tres tipos de "márgenes de placa": allí donde la corteza se crea, tenemos un margen constructivo; donde la corteza antigua desaparece, tenemos un margen destructivo, y donde las placas se rozan unas con otras, tenemos unos márgenes conservadores y se transforman en fallas, como la de San Andrés, en California, la cual separa la placa de América del Norte de la del Pacífico.

La inversión magnética ocurre muy pronto, teniendo en cuenta el tiempo de vida de la Tierra. El proceso completo necesita varios miles de años y, una vez que el campo magnético se ha establecido totalmente, en una dirección u otra, permanecerá así por un período que puede oscilar entre los 100.000 y los 50 millones de años. En la actualidad, el campo magnético de la Tierra se debilita lentamente, a un ritmo que puede hacerlo desaparecer en 2.000 años, de forma que es posible que estemos viviendo en las primeras etapas de la "próxima" inversión magnética. El efecto de dicha actividad puede ser de vital importancia para la historia de la vida en el planeta. Se ha sugerido que cuando el campo magnético sea muy débil o inexistente, el torrente de partículas cargadas procedentes del espacio —rayos cósmicos— que alcancen el planeta puede constituir un peligro para la subsistencia de la vida, sobre todo para la vida en la superficie. Normalmente, el campo magnético de la Tierra desvía estas partículas, que se almacenan en el cinturón de radiación de Van Allen, y luego rebasan cerca de los polos magnéticos produciendo la brillante aureola que puede verse

en las altas latitudes. Si, desprovistos del campo magnético protector, alcanzaran el suelo o bien la parte baja de la atmósfera, podrían revelarse muy perjudiciales para la vida, o desordenar el clima, que a su vez haría difícil la vida sobre la Tierra. Estas ideas no son más que especulaciones todavía, si bien algunos teóricos aseguran que la época que conoció la "muerte de los dinosaurios", hace unos 65 millones de años, coincidió (si puede utilizarse esta palabra) con una inversión magnética. Aunque esta parte de la historia es especulativa, el movimiento de los continentes a través de los procesos de las placas tectónicas ha sido crucial para la evolución de la vida.



Hace 200 millones de años — Hoy

Hace 135 millones de años — Dentro de 50 millones de años

La rotura de Pangea II es el más reciente acontecimiento de trascendencia de la historia tectónica de la Tierra, y en la actualidad se halla bien explicado a partir de los registros fósiles en las rocas. Una característica clave, en lo que a la vida terrestre se refiere, es la forma en que los continentes en la actualidad se han agrupado para asegurar que ambos polos estén cubiertos de hielo a la vez. Esta rara disposición geográfica hace a la Tierra propensa a las glaciaciones, y permite que los ciclos astronómicos de los modelos de Milankovič se hagan efectivos. La deriva continental, desde luego, no se ha detenido en la actualidad, y el Atlántico Norte, por ejemplo, se está ensanchando a razón de 2 centímetros por año. Dentro de 50 millones de años, la geografía del mundo será notablemente diferente y el paso más fácil de corrientes oceánicas templadas hacia el Ártico puede poner fin al actual ciclo de períodos glaciales.

En el momento presente, la corteza de la Tierra se divide en seis grandes placas, zonas sísmicamente estables que pueden contener corteza oceánica (como la placa del Pacífico), corteza continental (como la placa eurasiática), o una mezcla de las dos (como la placa de América del Norte, la cual se extiende desde la costa este del Pacífico hasta la cordillera del Atlántico). Además, existen alrededor de una docena de subplacas pequeñas, y algunas complejas y revueltas regiones en las fronteras, especialmente donde tres o más placas se encuentran, como en el Caribe. Grandes cadenas montañosas se forman donde las placas colisionan; cerca del océano Pacífico, en el cual la actividad ha provocado un cinturón volcánico conocido con el nombre de “cinturón de fuego” desde mucho antes de que la idea de las placas tectónicas se estableciera; en el Himalaya, donde India colisiona con Eurasia, y en los Alpes y los Pirineos, donde África colisiona con Europa. En el lugar en que la colisión se produce entre dos cortezas continentales, los sedimentos que se han acumulado sobre la plataforma continental son aplastados por la presión y convertidos en rocas de nuevas regiones montañosas, siendo empujadas hacia arriba como la pasta de dientes de un tubo, ayudando con todo ello a crear una nueva corteza continental. Esto es lo que está ocurriendo ahora en la región del Mediterráneo, donde en breve, en la escala de tiempo geológica, toda la corteza del suelo marino desaparecerá. Cuando placas de corteza continental chocan con placas de corteza oceánica, ésta se ve forzada hacia abajo, mientras que los sedimentos del suelo marino se juntan, de modo que coadyuvan a la construcción de cadenas montañosas en la costa. Mientras tanto, se fuerza a la corteza oceánica a seguir hacia abajo hasta que se deshace y se funde con el material caliente, originando así actividad volcánica, en tanto que el material continental se deforma por la presión. En ninguna otra parte puede observarse tan claramente dicho proceso como en las montañas que forman la espina dorsal de Sudamérica, en la parte oeste de la placa sudamericana. Semejantes procesos, a través de diversos ciclos de actividad tectónica, son los responsables de la existencia de las viejas cadenas montañosas que

hoy conocemos, mientras que el comienzo de nuevas fases de actividad se muestra en regiones tales como las del este de África o el mar Rojo, donde la expansión está rompiendo el continente, lo que puede llevar a la formación de un nuevo océano, si las grietas se ensanchan.

Todo este movimiento tiene una influencia directa en la vida actual; las erupciones del monte St. Helen o los estruendos de la falla de San Andrés son parte del modelo de actividad tectónica. Hace mucho tiempo —unos 3.000 millones de años—, cuando la Tierra era más caliente y la convección más energética, cuando la corteza era mucho más delgada de lo que es ahora, y antes de la formación de muchas montañas, el modelo de comportamiento hubiera sido definido de modo muy diferente. Durante los últimos cien millones de años, no obstante, los procesos de las placas tectónicas probablemente se han ido sucediendo tan a menudo como en la actualidad, reorganizando la distribución de continentes y océanos por medio de cuatro grandes fases de actividad. Y esas reorganizaciones, al parecer, han tenido efectos en la vida, efectos tan importantes que se hace necesario mencionarlos aquí, justo antes de empezar a narrar la historia de la vida en la Tierra.

En términos geológicos, todo lo ocurrido hace más de 570 millones de años (alrededor del 90% de la historia de la Tierra) se define como Precámbrico, y muy poco se conoce acerca de todo ello. A medida que nos vamos acercando a nuestros días, las divisiones de las etapas geológicas se acortan, gracias a nuestro mejor conocimiento de tiempos recientes. Durante los últimos 570 millones de años, que creemos conocer mejor, parece ser que primero se fragmentó un supercontinente para formar cuatro continentes separados, que se volvieron a juntar y finalmente se separaron de nuevo, primero formando Laurasia y Gondwanaland y luego formando los siete continentes actuales. Estos acontecimientos coinciden intrigantemente con el cambio de modelos de vida sobre la Tierra y, en particular, con el gran número de especies encontrado en forma de fósiles, fósiles, sobre todo, de criaturas que vivían en mares poco profundos.

Para explicar esto, imaginemos la situación de la Tierra cuando estaba formada por un solo supercontinente (Pangea). Una masa tan vasta de Tierra debía de tener unos veranos muy calurosos y unos inviernos muy fríos, puesto que el efecto moderador de los océanos no alcanzaba a las zonas del interior. También debía de tener un "medio ambiente" marino en la costa, de manera que las criaturas del mar pudieran moverse libremente por toda ella. Ahora imaginemos lo que ocurre cuando el continente se agrieta y se divide en varios continentes más pequeños. En primer lugar, el clima se hace menos extremado (salvo en algunos casos especiales), ya que la influencia marítima llegaría a más porciones de Tierra que antes.

En segundo lugar, cada plataforma continental se separa de las otras, de forma que las distintas especies de animales marinos no pueden desarrollarse de la misma manera en las costas de todos los continentes. Todo ello facilitaría el desarrollo de la vida (climas menos extremos permiten diferentes e independientes modos de crecimiento, mientras que un grupo de pequeños continentes permite una mayor variedad de fósiles que en un solo supercontinente). Y es esto exactamente con lo que nos encontramos.

Cuando Pangea 1 se desmembró hace unos 600 millones de años, la diversidad en la fauna se incrementó de una manera espectacular, hasta que los cuatro nuevos continentes se acabaron de formar, unos 450 millones de años atrás, al final del Ordoviciense. La diversidad continuó hasta hace unos 200 millones de años, momento en que los cuatro continentes volvieron a unirse durante el Pérmico, conformando otro supercontinente, Pangea II. Llegados a este punto, el número de especies diferentes disminuye de una manera también espectacular; pero Pangea II tiene una corta vida, puesto que se fragmenta pronto en nuevos continentes; primero Laurasia y Gondwana, separados por un océano, Tetis, y luego, en un posterior desmembramiento, se dividió de una forma parecida a la que conocemos hoy, aunque con los actuales continentes situados en posiciones algo diferentes. De todo ello hace 70 millones de

años, hacia el final del Cretácico[29]. La variedad de las especies aumentó durante esta etapa de desmembramiento; primero, cuando se pasó de un continente a dos y, luego, de dos a siete. El mundo presente posee múltiples e interesantes hogares para proveer a los habitantes de la plataforma continental, los cuales en ningún momento de los últimos 600 millones de años han llegado a ser tan diversos. Si los continentes no se hubieran movido ni se hubieran reagrupado tal como lo hicieron, la evolución de la vida sobre la Tierra hubiera sido mucho más simple, más torpe y, sin lugar a dudas, no habría desembocado en nacimientos de especies inteligentes.

Esta es mi forma de llegar a la historia de la vida, si bien mi disertación sobre "la revolución en las ciencias de la Tierra" verificada en los años sesenta ha tenido que ser, forzosamente, superficial, por razones de espacio. Todavía hay, sin embargo, una segunda revolución en las ciencias de la Tierra, en los años setenta, que fue la consecuencia de los conocimientos adquiridos durante la década anterior. Esta segunda revolución concierne a un tema muy importante para la historia de la vida, y en particular para la historia de la vida humana: las causas de los cambios climáticos y el flujo y reflujo de las enormes capas de hielo de nuestro planeta.

NUESTRO CAMBIANTE CLIMA

Los geólogos pueden reconstruir la historia de los cambios climáticos del pasado por la forma en que éstos han afectado a los sedimentos depositados en diferentes épocas. Como ejemplo más claro, los movimientos de las capas de hielo a través de las rocas durante los períodos glaciales produjeron marcas visibles después de cientos de millones de años. Mediante la datación de diversos estratos de rocas, el empleo de una gran variedad de técnicas y la búsqueda de señales que revelen el paso de los hielos, los geólogos pueden decir (con un margen

[29] Algunos especuladores discuten si ésta puede ser, más que la razón del cambio magnético, la causa, tal vez, de la desaparición de los dinosaurios.

de error de unos pocos millones de años) cuándo el hielo cubrió una determinada porción de la corteza continental. Pero esto sólo es la mitad de la historia; también tienen que precisar dónde se encontraba esa determinada porción de la corteza cuando el hielo la cubría, porque —como ya sabemos— la geografía del globo cambia constantemente debido a la deriva de los continentes, o, si se prefiere, gracias a que son empujados por el mecanismo de expansión del fondo marino. La reconstrucción de la posición estriba, en buena medida, en que se hagan corresponder los modelos geológicos de los distintos continentes actuales con las “líneas cebra” ya mencionadas, y también el magnetismo de los fósiles de los estratos en diferentes partes del mundo. La corteza continental contiene igualmente rocas magnetizadas, que indican la dirección y, en algunos casos, la localización de cierta parte del continente en el momento en que un determinado estrato se deposita. Así que, de una forma u otra, es posible realizar un esquema de los cambios climáticos que se han ido produciendo durante los pasados mil millones de años, aproximadamente. Y esto puede compararse con la geografía del mundo —la distribución de los continentes— de hace unos 600 millones de años, y más vagamente con la geografía anterior.

En esa escala de tiempo, el clima “normal” de la Tierra se supone que es caliente y húmedo. A intervalos de 250 a 300 millones de años tiene lugar un cambio que trae consigo un régimen climático más frío, una “época” glacial que abarca unos 50 o 100 millones de años. Durante esta época glacial, los glaciares pueden subir o bajar varias veces, cubriendo una gran extensión de Tierra, o bien limitándose tan sólo a cubrir las partes polares. Los intervalos entre los períodos glaciales de una época glacial reciben el nombre de interglaciales; por cierto, ahora nos encontramos en uno de ellos.

Se ha especulado mucho acerca de las causas del ritmo de los cambios climáticos. A gran escala, se ha dicho que la aparición de hielos en un mundo caliente se debe a las alteraciones producidas en el Sol y a otros fenómenos ocurridos durante el tránsito del Sistema Solar a través de nubes de polvo en nuestra

Vía Láctea. Si estas ideas son posibles, no están, sin embargo, necesariamente en lo cierto. La mejor sugerencia es la que remite estos cambios de clima a las modificaciones en la geografía de nuestro planeta.

Es natural que empecemos fijándonos en la situación actual, que conocemos casi a la perfección, y que luego la comparemos con las alteraciones ocurridas durante los últimos cien millones de años. Hoy día, es obvio que las zonas más frías del planeta son los polos, donde el Sol sólo aparece en el horizonte y calienta menos que en otros lugares cada metro cuadrado de suelo. La atmósfera y los océanos compensan ese desequilibrio del calor solar en la medida en que la convección atmosférica y, más importante todavía, la circulación oceánica transporta aire y agua cálidos provenientes de la zona ecuatorial, entre los trópicos. Con la actual geografía, no obstante, el agua caliente no puede penetrar por completo en las zonas polares. En el sur, el continente antártico se asienta alrededor del polo, de manera que el agua no puede llegar al polo propiamente dicho, si exceptuamos el agua que cae del cielo en forma de nieve, imposibilidad que ha permitido la formación de la mayor capa de hielo que existe en la actualidad. En el norte, a pesar de que hay un mar polar, éste está prácticamente rodeado por masas de tierra, de modo que es casi imposible que las grandes corrientes de agua cálida, tales como las del Gulf Stream, penetren lo suficiente; en consecuencia, durante todo el año, en el Ártico hay una capa de hielo, delgada en comparación con la del Polo Sur, pero tan considerable como ésta. Así es que la actual época glacial, una serie de períodos glaciales que comenzó hace unos 10 millones de años, puede ser perfectamente entendida en términos de reagrupación de las masas de tierra continental. Cuando encontramos —y lo hacemos— restos de bosques tropicales en la Antártida (en forma de depósitos de carbón) no quiere ello decir que el Polo Sur fuera alguna vez tropical, sino que, en algún momento, la Antártida formó parte de las tierras de las regiones tropicales; cuando encontramos rastros de glaciación en rocas antiguas del Brasil, no queremos decir que tiempo atrás fueran las regiones tropicales las que

estaban cubiertas por los hielos, sino que el Brasil formó parte de un continente polar.

Los glaciares se crean en el momento en que cualquier masa continental se desplaza hacia alguno de los polos, bloquea el agua caliente y construye una capa de nieve que se hiela. Algunas veces esto ocurre cuando el otro polo todavía permanece abierto a esas aguas calientes y los otros continentes se reagrupan en las latitudes bajas, cerca del ecuador. Pero en las épocas glaciales como la presente, depende de la existencia simultánea de tierra en los dos polos, ya sea sobre el mismo polo, como en la Antártida actual, ya sea rodeando el mar polar, como ocurre en el Polo Norte.

La gran época glacial centrada unos 700 millones de años atrás, en los tiempos de Pangea I, tal vez sea un buen ejemplo de esta última clase. Parte del supercontinente sobrepasó un polo, con lo que permitió que se formara hielo. Pero siendo tan pequeño el fragmento del supercontinente que se desprendió, el otro polo debió permanecer caliente y húmedo. Cuando Pangea I se desmembró y cada una de sus cuatro partes siguió su propio camino, el agua cálida pudo alcanzar sin dificultad ambos polos de modo que la Tierra se mantuvo caliente durante unos 300 millones de años, en tanto que la flora y la fauna se diversificaron. Luego llegó la época en que los cuatro continentes se reunieron para conformar Pangea II, supercontinente del cual procede la presente fase de la actividad tectónica.

Desde la época de Pangea II tenemos un buen conocimiento de cómo la expansión del fondo del mar y la deriva continental han influido en la configuración del aspecto siempre cambiante de la Tierra. Durante el ensamblaje de Pangea II, una masa de tierra constituida por lo que hoy es Sudamérica, África, la Antártida y Australia se desplazó hacia el Polo Sur, cuya glaciación resultante nos dejó sus huellas. Incluso tras el ensamblaje, hace unos 300 millones de años, la punta sur se extendió hacia el Polo Sur, lo cual aseguró glaciares continuos, a pesar de que la gran masa de tierra se había desplazado hacia los trópicos. Nuevamente, como en los tiempos de Pangea I, la presencia de una enorme masa de tierra significaba que sólo un polo estaría

cubierto de hielo, mientras que el mar del Polo Norte permanecía caliente gracias a las corrientes de agua procedentes de los trópicos. Hace alrededor de unos 250 millones de años, después de unos 50 millones de años de permanencia en un lado, Pangea II comenzó a alejarse del Polo Sur y, a la vez, a resquebrajarse. Durante 200 millones de años la Tierra volvió a ser caliente; la nieve y el hielo eran un simple fenómeno local característico de las altas montañas. De nuevo, la fauna y la flora se extendieron y diversificaron, hasta que hace 55 millones de años el planeta volvió a enfriarse en su totalidad. La Antártida, ahora separada de Australia, se desplazó lentamente hacia su actual posición en el Polo Sur; al igual que se desplazaron los continentes del norte hacia sus radicaciones actuales; al mismo tiempo el Atlántico se iba ensanchando y los grandes océanos del otro lado del mundo desaparecían y se transformaban en el océano Pacífico que hoy conocemos. Hace unos 10 millones de años, el actual sistema de hielos estaba ya establecido, con glaciares en Alaska y en otras regiones septentrionales, y con la mitad del tamaño que hoy tiene la capa helada de la Antártida, la cual, 5 millones de años atrás, quizá fue mayor; luego, hace 3 millones de años, aparecieron por primera vez —en la presente época— grandes capas de hielo en las masas continentales del norte, a lo largo del océano del Atlántico Norte. Alcanzado este estadio, dichas capas iniciaron un largo y complejo camino de avances y retrocesos, siguiendo tres ritmos principales: 100.000, 42.000 y 22.000 años atrás. Estos ritmos son los que están detrás del flujo y reflujo de los hielos y de la aparición de los interglaciales. La humanidad surgió durante la presente época glacial y nuestra civilización lo hizo durante el actual interglacial, de modo que esos ritmos mencionados son de vital importancia para nosotros. Y son éstos los que explicó satisfactoriamente la segunda revolución de las ciencias de la Tierra, durante los años setenta.

Antes de ver en detalle la fuerza motriz que hay detrás de los períodos glaciales, tan importantes para la vida humana, vale la pena poner atención en la inusual naturaleza de la geografía actual. Han existido otras épocas glaciales en los últimos

mil millones de años, pero sólo, al parecer, cuando una única masa de tierra se ha desplazado hacia un polo, dejando el otro polo libre de hielos. Las condiciones que permiten que los polos de ambos hemisferios estén helados no son muy habituales en la historia de la Tierra. Los fenómenos resultantes (en lo que a la vida se refiere) tuvieron un papel destacado a la hora de hacer surgir vida inteligente, puesto que cuando la vida es fácil y el medio ambiente no es cambiante, la especialización, más que la adaptabilidad, es la que ayuda a asegurar la supervivencia de las especies. Ésta es, tal vez, la razón por la cual *nosotros* hemos aparecido en la Tierra en el presente momento geológico, hijos de la actual época glacial y nietos de la reordenación de los continentes; productos, en definitiva, del proceso de las placas tectónicas.

EL RITMO DE LOS PERIODOS GLACIALES

La epopeya en torno al desarrollo del conocimiento sobre los ritmos de las glaciaciones en la actual época glacial tiene curiosas similitudes con la del conocimiento de la deriva continental. La teoría, que explica el flujo y reflujo de los períodos glaciales de acuerdo con los cambios en la órbita terrestre alrededor del Sol, es conocida como modelo de Milankovič, después de que Milutin Milankovič, de Yugoslavia, descubriera, hace unos cuarenta años, algunas evidencias de la certeza de dicha teoría. Y si la idea de la deriva continental precedió a su profeta Alfred Wegener, la idea de la teoría astronómica de los períodos glaciales precedió a Milankovič, y las dos historias se convierten en paralelas, puesto que uno de los partidarios de la antigua versión de la teoría, pre-Milankovič, fue el mismo Alfred Wegener. Ambas ideas tuvieron que sobrevivir varias décadas antes de que se demostrara su validez, y en ambos casos la demostración quedó a merced de nuevas investigaciones sobre la Tierra, facilitadas por el progreso de las técnicas —ni la idea de la deriva continental ni el modelo Milankovič pudieron ser demostrados en el momento de su formulación, con lo cual

puede considerarse que Wegener y Milankovič realmente se adelantaron a su tiempo.

Si bien la fuerza conductora que hay detrás de la deriva continental no está muy clara para los especialistas, Milankovič, sin embargo, partió de una bien conocida fuerza astronómica y buscó explicar el modelo de los períodos glaciales dentro de un sistema. Tres cambios cíclicos en el movimiento de la Tierra a través del espacio se combinan para producir una serie de alteraciones en el modelo de radiación solar que llega a distintas latitudes de la Tierra en diferentes períodos del año, y esas alteraciones son la clave del modelo. La más larga, aunque no necesariamente la más importante, es una variación que se repite cada 90.000 o 100.000 años, período durante el cual la forma de la órbita terrestre pasa de ser casi circular a ser elíptica. Esto no modifica la cantidad total de calor que llega a la Tierra desde el Sol; la distancia media que hay entre aquélla y éste[30] es siempre la misma. No obstante, cuando la órbita es circular el calor del Sol está más repartido a lo largo de todo el año, y. contrariamente, cuando la órbita es elíptica unos meses sufren más calor que otros, puesto que la Tierra estará más cerca del Sol en determinados momentos de su recorrido. Esto producirá un contraste entre unas épocas del año y otras, pero el promedio de calor que llega a la Tierra es el mismo.

En segundo lugar, hay un ciclo de unos 40.000 años, al cabo de los cuales la inclinación de la Tierra varía. En la actualidad, la Tierra tiene una inclinación de 23º,40, en comparación con el plano de su órbita alrededor de Sol, o con una línea que fuera desde el centro del astro hasta el centro del planeta. En julio, el Polo Norte está orientado hacia el Sol, de modo que tenemos verano en el hemisferio norte. En enero, cuando la Tierra se halla justo al otro lado del Sol, el Polo Norte sigue apuntando en la misma dirección, sólo que en ella ya no se encuentra el Sol; en consecuencia, en el hemisferio norte es ahora invierno. Lo contrario, obviamente, es lo que ocurre en el sur. Todo ello nos presenta el modelo de estaciones que tan bien conocemos.

---

[30] Por año o grupo de años.

La inclinación de la Tierra oscila entre los 21º,80 y 24º,40 al cabo del ciclo de 40.000 años antes mencionado, y cuanto más pronunciada, mayor es el contraste entre las estaciones. Así pues, los milenios con menos inclinación disfrutan de una mejor distribución del calor solar.

Por último, a pesar de que la orientación de la Tierra en el espacio no cambia de manera significativa en el curso de un mismo año, ésta se tambalea como una peonza mientras gira a través del espacio en la dirección en la que "apunta" el eje polar, dibujando una circunferencia alrededor del cielo durante un período de 21.000 años. Este tambaleo puede incluso modificar la cantidad de calor que llega a diferentes partes de la Tierra y en diversas épocas del año, si bien tampoco tiene ningún efecto en la suma total de calor ("insolación") que recibe la Tierra en el curso de un año[31].

Así, la combinación de estos tres efectos origina este complejo modelo de variaciones sobre el calor de las estaciones de los hemisferios norte y sur, mientras que la cantidad total de insolación permanece invariable. Y es fácil comprender cómo tales cambios de insolación han podido provocar el flujo y reflujo de los hielos, dada la actual y peculiar distribución de los continentes.

LA SITUACION ACTUAL

Observando la Tierra en el presente, ¿qué cambios en el calor de las estaciones serían necesarios para provocar la proliferación de hielos en las altas latitudes? En el hemisferio norte, donde existe una considerable cantidad de tierra alrededor del frío mar polar, la nieve que cae se deposita en el suelo, y es más

---

[31] He discutido sobre cómo conocemos estos cambios. De hecho es necesario (aunque tedioso) calcular los giros de la Tierra ocasionados por los efectos gravitatorios que sobre nuestro planeta ejercen el Sol, la Luna y otros planetas del Sistema Solar, destacadamente Júpiter; además, los ciclos más cortos han producido cambios en la aparición de las estrellas durante la noche, de modo que dichos efectos se confirman por medio de la observación.

bien poca la que cae en el agua y se funde. El invierno puede llevar nieve a cualquier lugar de los continentes del norte. La mejor forma, pues, de crear un nuevo período glacial es la de tener veranos fríos para que la nieve se mantenga a lo largo del año. Una vez creados la nieve y los campos de hielo, estos mismos acrecientan el efecto de enfriamiento mediante su fuerte brillantez, la cual les permite reflejar una gran cantidad de calor solar. De acuerdo con el modelo Milankovič, los períodos glaciales sólo pueden desarrollarse en el norte cuando los giros de la Tierra posibiliten veranos fríos.

En el sur, el modelo se invierte. Allí, el polo mismo está cubierto por un continente y una gran capa de hielo, y, a su vez, rodeado por el mar. La nieve que cae sobre el mar se funde y, por tanto, la única forma de que las capas de hielo se ensanchen es que se den unos inviernos tan fríos que el mismo mar se congele. Una vez se congela, incluso el calor de un verano ardiente puede ser reflejado por la brillantez de las capas de hielo sin que se funda totalmente. De modo que para la creación de períodos glaciales en el sur, lo que necesitamos son inviernos muy rigurosos. Y, como es fácil suponer, los modelos cambiantes de los ciclos de Milankovič deben producir veranos frescos en el norte al mismo tiempo que crudos inviernos en el sur, puesto que el verano del norte coincide en la misma órbita de la Tierra con el invierno en el sur.

Hasta aquí todo es correcto y en cierto modo sencillo. Al objeto de probar la teoría era necesario, en principio, encontrar los modelos de las pasadas glaciaciones con los ritmos de Milankovič, luego dilucidar qué estaciones son las más críticas para los cambios de insolación y, finalmente, establecer el grado de variación en la insolación suficiente que responda del volumen de hielo producido en el período glacial y fundido durante el interglacial. Fue en el primer paso donde el modelo de Milankovič falló hace ahora cuarenta años. En esa época, los geólogos pensaban que sólo habían tenido lugar cuatro o cinco períodos glaciales completos en el pasado más reciente. Así que la teoría fue desechada durante los años treinta, cuarenta y cincuenta. Pero luego, las avanzadas técnicas de investigación

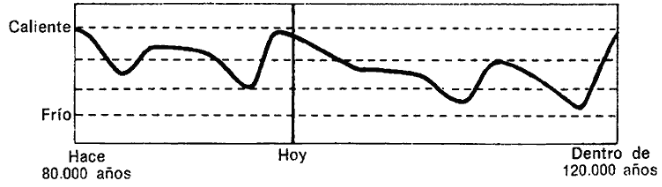
fueron cambiando nuestro conocimiento del ritmo de los hielos, y cada cambio trajo consigo un esquema de la historia de la Tierra más próximo a los cálculos efectuados por Milankovič.

Los nuevos conocimientos sobre el flujo y reflujo de los períodos glaciales dependen tanto de un mejor material del cual recoger información sobre el pasado como de la mejora de las técnicas encaminadas a recogerla. La materia prima la obtenemos mediante la perforación de los fondos marinos, los que producen núcleos de sedimento que nos proporcionan una visión, capa por capa, de todo lo depositado cada año, y mediante estudios realizados sobre capas similares en tierra, juntamente con capas extraídas de debajo de los hielos, en las altas latitudes. Las técnicas “convencionales”, tales como el examen de restos fósiles, han desempeñado un papel determinante en la elaboración de un esquema sobre los cambios climáticos, pero la técnica clave depende del análisis de los isótopos de diversos elementos encontrados en diferentes capas.

La proporción de isótopos pesados de oxígeno-18 del agua, hielo y la atmósfera de cualquier época nos facilita un “termómetro” natural. Puesto que dichos isótopos son más pesados que los más comunes del oxígeno-16, las moléculas de agua que los contienen (H_2O-18) se evaporan con menos facilidad, si bien se condensan con menos dificultad, que las moléculas del 0-16. Las cantidades relativas de O-16 y O-18 encontradas en las distintas capas de sedimento o de hielo de un glaciar nos proporcionan una medida muy precisa de la temperatura de la Tierra[32].

[32] El oxígeno de los sedimentos se halla principalmente en forma de carbonatos, esto es, en los huesos de animales muertos. Los carbonatos también nos brindan la posibilidad de “datar” sedimentos de unos 100.000 años, en razón a la tasa de radiocarbono (carbono-14) que los mismos contienen. Estas técnicas son muy complejas y requieren unos amplios conocimientos, motivo por el cual ha tardado tanto la comprensión de los períodos glaciales La evidencia, no obstante, es en la actualidad del todo incontrovertible; ello se lo debemos a los trabajos pioneros llevados a cabo en los años cincuenta por Cesare Emiliani.

Colocando todas las piezas juntas, con miles de cortezas del suelo marino y docenas de capas de hielo acumuladas durante dos décadas, la situación ya estaba madura, hacia la mitad de los años setenta, para una cabal rehabilitación de los modelos de Milankovič. Para entonces estaba claro que habían sucedido, en los dos últimos millones de años, varias glaciaciones, separadas por breves interglaciares; Jim Hays y algunos de sus colegas del Lamont-Doherty Geological Observatory de Nueva York publicaron en 1976 lo que se considera por muchos como la más irrebatible evidencia de todo lo anterior. Sus resultados se basaban en minuciosos análisis de dos capas superpuestas de la parte sur del océano, las cuales cubren ambas unos 450.000 años, suficientes para mostrar la veracidad incluso del ciclo más largo de los establecidos por Milankovič . En los análisis clave se tomaron muestras de la capa cada 10 cm, que correspondían a intervalos de 3.000 años, lo bastante cortas como para probar los ciclos más breves. Y precisos exámenes estadísticos de las variaciones de temperatura disipan cualquier duda en los investigadores del Lamont-Doherty: «No puede haber ninguna duda en que una cumbre espectral centrada en un ciclo de alrededor de 100.000 años es una de las más importantes características de la evolución climática. ...Los ciclos dominantes... que van desde 42.000 a 43.000 años y tres cumbres... corresponden a ciclos de 24.000 años.» El más breve de dichos períodos parece ser el que produce unos efectos más espectaculares, con el prolongado ciclo de 100.000 años modulando las otras influencias, de manera que a veces no tiene efectos y otras veces se suma a ellos. Las estadísticas también muestran la existencia de un ciclo de 19.000 años, que explican las versiones más modernas de los modelos de Milankovič, cuya época se ha datado con la ayuda de computadores electrónicos de alta velocidad. El éxito de la combinación entre teoría y cálculo en la explicación del modelo de los anteriores períodos glaciales nos proporciona una buena guía para el futuro (debemos esperar una larga tendencia durante los próximos mil años hacia una extensa glaciación en el hemisferio norte, con el actual interglaciar casi concluido).



Con la actual disposición de los continentes, los ritmos combinados de los ciclos de Milankovič nos explican las recientes variaciones climáticas y, al mismo tiempo, nos suministran un pronóstico a largo plazo. Aunque la deriva continental pueda romper la configuración que permite la aparición de períodos glaciales cada 50 millones de años poco más o menos, para los próximos 60.000 años, o más, la perspectiva es decididamente desfavorable. (En base a los cálculos recientes del efecto Milankovič efectuados por N. Calcer.)

¿Y qué hay de los extremos del modelo todavía no aclarados? Por una de esas magníficas casualidades que sobrevienen en la ciencia de vez en cuando, han conseguido ser, en su mayoría, solucionados en dos años, 1975-76, momento del mejor estudio sobre la corteza marina. Cálculos realizados por separado por Max Suárez e Isaac Held, de la Universidad de Princeton, y George Kukla, del Lamont-Doherty, identificaron en el verano tardío-otoño temprano la estación clave para la extensión de los hielos en el hemisferio norte, y la localización geográfica clave en el interior de Norteamérica y Eurasia. A su vez, John Masón, director general de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, proporcionó lo que puede ser considerado como el "pronóstico" meteorológico con cálculos que han demostrado que los cambios relativos a la insolación en las estaciones críticas de los pasados 100.000 años estaban relacionados con el flujo y reflujo de los hielos. Sabemos cuánto calor se emplea cuando el vapor de agua cae en forma de nieve y sabemos también cuánto es necesario para convertir en agua cada gramo de hielo. Comparando el "excedente" o el "déficit" de insolación producido por los ciclos cambiantes de Milankovič con el volumen del hielo de nuevo creado o derretido cada milenio de los pasados 100.000 años, Masón mostró que la cantidad de hielo formada en un milenio frío coincide exactamente

con el déficit de insolación apuntado por Milankovič, en tanto que la cantidad mezclada durante el milenio caliente coincide con el excedente de insolación. Con estos minuciosos cálculos, proporcionó el más perfecto pronóstico a largo plazo (las condiciones de salida del período glacial, iniciado hace 18.000 años, llevaron al mundo hasta el actual interglaciar, ello gracias a los tres ciclos descubiertos por Milankovič); sucedió esto hace 6.000 años, cuando la órbita excéntrica y el tambaleo de la Tierra se combinaron para aumentar el calor de los veranos septentrionales, al mismo tiempo que la inclinación de la Tierra alcanzaba su punto máximo. Desde entonces, los tres factores se han combinado del modo más satisfactorio posible, en lo que a calor del verano del norte se refiere, y las condiciones se mantienen fijas. Con 60.000 años por delante de geometría orbital menos favorable, el próximo período glacial está cerca, lo cual, en nuestra escala temporal, quiere decir que puede empezar dentro de 1.000 años o quizá 5.000, si la naturaleza sigue su curso.

Y aquí es donde estamos ahora. Nuestra civilización es un producto del interglaciar en curso, y tal vez sea la víctima de la próxima glaciación. Por otro lado, la tecnología y unas variaciones en el medio ambiente, deliberadas o no, accidentales o inducidas, pueden prevenir la "próxima" glaciación. Porque los cambios climáticos son tan importantes para la vida en la Tierra, incluyendo la humana, me he extendido tanto en la explicación de dichos cambios, que son pequeños si tenemos en cuenta la larga historia de nuestro planeta, pero que tan relevante papel han desempeñado en el origen del mismo tal como hoy se nos aparece. En cuanto a los cambios físicos en la Tierra, ya hemos llegado hasta la actualidad. Durante la mayor parte de sus 4.500 millones de años de existencia, no obstante, nuestro planeta ha tenido moradores: organismos vivos, y para comprender nuestro propio origen debemos retroceder hasta los orígenes de la vida en la Tierra, e incluso, quizá, hasta antes de la formación de ésta.

V. EL ORIGEN DE LA VIDA

Para comprender el origen de la vida, requerimos saber un poco de química, la disciplina científica que describe cómo se agrupan los átomos en moléculas y forman diferentes sustancias (componentes químicos diversos). Dentro de una estrella, a pesar de que elementos diferentes pueden crearse por fusión de protones y neutrones, el material, mientras la estrella se mantiene caliente, permanece en forma de plasma: un mar de núcleos atómicos cargados positivamente, dentro, a su vez, de un mar de electrones cargados negativamente. Cuando hablábamos de la evolución de la Tierra, nos interesábamos, con prioridad, por el comportamiento de la materia a gran escala: un océano entero, un continente. Pero la vida, el origen de la vida, depende de manera crucial del comportamiento de átomos individuales, y de los átomos de un elemento en particular.

Bajo las condiciones de temperatura y presión que se dan en la superficie de un planeta como la Tierra, más que bajo las condiciones del interior de una estrella como el Sol, los núcleos cargados positivamente y los electrones cargados negativamente se unen para formar átomos eléctricamente neutros. El átomo más simple, el de hidrógeno, consiste en un único protón, que constituye el núcleo, y un electrón que lo rodea. La idea de un simple electrón capaz de rodear algo, aunque sea un simple protón, es extraña para la mentalidad humana, acostumbrada al comportamiento de las cosas en la vida diaria (¿cómo puede una pelota de golf rodear una pelota de cricket?), pero es que he utilizado el término de modo deliberado. Cuando la estructura atómica se exploró por primera vez, y las diferencias entre núcleo y electrón fueron estudiadas, el primer "modelo" imaginario de átomo colocó los electrones alrededor del núcleo, como los planetas alrededor del Sol. Pero los electrones no se comportan como partículas sólidas, a la manera de los

planetas, y por diversos motivos los electrones pueden describirse como ondas. Así como la teoría de la relatividad revela que la masa y la energía son intercambiables, otro de los grandes descubrimientos de la ciencia del siglo XX, la mecánica cuántica, revela que las partículas sólidas pueden ser entendidas como ondas, y que la radiación energética puede serlo como partículas, con dependencia de las circunstancias. El ejemplo clásico es la luz, en cuyo caso la discusión sobre si la luz está formada por pequeñas partículas o si es un tipo de onda energética se remonta a los tiempos de Newton. Desde Newton hasta ahora, los defensores de cada postura podían demostrar, por medio de experimentos, que estaban totalmente en lo cierto; en efecto, bajo condiciones adecuadas, la luz puede comportarse como una onda o bien como un grupo de partículas. Ahora sabemos que ambos puntos de vista son correctos; la luz es tanto partícula como onda, y lo mismo pasa con lo demás, aunque, a veces, la dualidad onda-partícula sea más obvia.

La razón por la cual dicha dualidad no es tan obvia en la vida cotidiana es clara si tenemos en cuenta algunos experimentos efectuados con electrones durante los pasados cincuenta años o más. Cuando estos experimentos se han utilizado para medir la longitud de onda de los electrones de un "rayo", se ha procedido como si éstos fueran de radio o de luz. Cuando los experimentos se han realizado para medir el *momentum* (equivalente a masa x velocidad) de las partículas del rayo, se han medido como si los electrones fueran una serie de diminutas balas de cañón. Un resultado curioso se desprende de todos estos experimentos. Se mida cuando se mida el *momentum* y la longitud de onda, el resultado *(momentum* por longitud de onda) es siempre el mismo, un número que se conoce como la constante de Planck, en honor del físico alemán Max Planck. La constante de Planck es muy pequeña, $6{,}626\times10^{-27}$ erg, pero el comportamiento de los electrones se dirige con gran precisión hacia ella. Si se introducen los electrones del rayo rápidamente en el aparato de experimentación, de forma que el *momentum* de cada uno sea el doble, la longitud de onda se reduce,

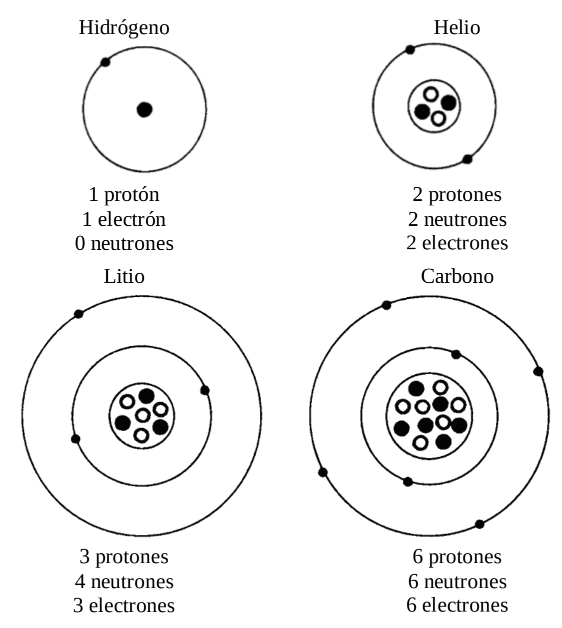
de manera que él producto es el mismo: $6{,}626\times10^{-27}$ erg. Así pues, la constante de Planck describe de una manera fundamental la relación entre la naturaleza de partícula y la naturaleza de onda de las cosas. Debido a que la masa de un electrón es de unos 9×10^{28} gramos, es fácil equilibrar las dos partes de la ecuación de Planck para electrones y, así, la dualidad onda-partícula resulta muy nítida. De todos modos, para un objeto normal (mi máquina de escribir, por ejemplo) la masa alcanza muchos gramos —incluso cientos o miles de gramos— y para lograr equilibrar la ecuación deberíamos dar a su equivalente en onda una absurda longitud de onda pequeña. En la práctica, las ondas de mi máquina de escribir pueden ser ignoradas. Ello no quiere decir que una máquina de escribir, o un coche, o una pelota no tengan su equivalente en ondas, lo que ocurre es que sus componentes en partículas son las que dominan, toda vez que la constante de Planck es tan pequeña[33].

Continuar con este tema nos apartaría demasiado de la historia que estamos desarrollando en este libro y, por otra parte, con lo dicho hasta ahora tenemos ya suficiente información como para poder volver a ver cómo un electrón puede rodear un núcleo atómico. Imaginando al electrón como una especie de haz de ondas energéticas, comprenderemos mejor cómo es posible que pueda rodear a un protón. Como las ondas de sonido que resuenan dentro de los tubos de un órgano, o las vibraciones de una cuerda de guitarra, la "onda" de un electrón puede transformarse en vibraciones estables, o resonancias. De forma similar, un grupo de partículas se asentará en su estado más estable, mientras que el haz de ondas del electrón se unirá al núcleo atómico, a manera de onda estacionaria rodeando a éste. Resulta imposible apuntar hacia un lugar cerca del núcleo, y decir: "ahí está el electrón". Todo lo más, podremos adelantar que "la energía del electrón está distribuida en esta zona del

---

[33] Por qué la constante de Planck debe ser tan pequeña ya es otra cuestión distinta. Si la constante fuese mayor, la vida sería muy interesante (de existir vida) y las máquinas de escribir tendrían que ser tratadas como ondas. Los límites entre vida, Universo y la índole de las constantes fundamentales de la naturaleza serán discutidos más adelante en este libro.

espacio que rodea al núcleo". Dicha zona que rodea al núcleo, donde el electrón sitúa su onda estacionaria, se llama "capa electrónica".



Algunos de los elementos más simples. Aunque el núcleo, constituido por protones y neutrones, reside en el centro del átomo, así como el Sol se halla en el centro del Sistema Solar, la representación de electrones en órbitas semejantes a las de los planetas alrededor del Sol no resulta estrictamente exacta. Debido a efectos cuánticos importantes en la escala del átomo o del electrón, hay que pensar que cada electrón "rodea" el núcleo en tres dimensiones. Pero en los dibujos bidimensionales, la representación "orbital" muestra por lo menos cómo sucesivos electrones son añadidos en capas cada vez más externas y señala cuántos electrones existen en cada capa. El carbono es especialmente interesante porque "necesita" o bien añadir cuatro electrones para completar su capa más externa, o bien perder cuatro electrones para dejar una capa superficial completa. Esto constituye la base de la enorme variedad de reacciones químicas de las que depende la vida.

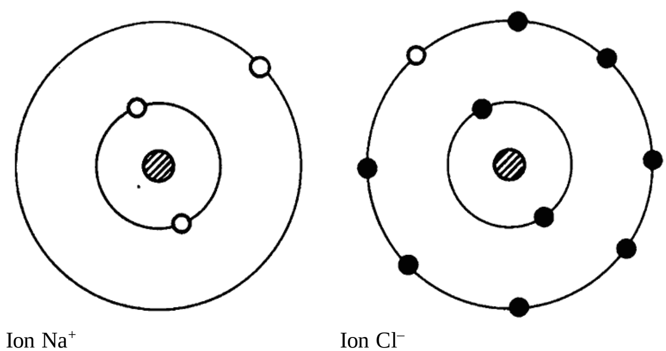
ATOMOS, ISOTOPOS Y MOLÉCULAS

Tenemos, pues, que un protón puede ser rodeado por un electrón, en forma de onda energética, para convertirse en un elemental átomo de hidrógeno. El hidrógeno pesado es lo mismo, pero con la particularidad de que en su núcleo hay un neutrón, además de un protón. Es el mismo elemento, en términos químicos, ya que la forma en que un átomo se interrelaciona con otros depende de lo que el átomo "ve", y lo que ve es un electrón rodeando un núcleo. El electrón es la parte accesible del átomo, y a los demás átomos les importa poco el número de neutrones que puede albergar el núcleo, ya que su posible interacción se limita a los electrones de la capa electrónica más exterior de los demás átomos.

El siguiente elemento es el que contiene dos protones en el núcleo, y al que, por consiguiente, rodean dos electrones. Se trata del helio, cuyo núcleo, por fin, acabamos de conocer. Los núcleos del helio pueden contener un neutrón o dos, con dos isótopos (helio-3 y helio-4, nombres que hacen referencia al número total de partículas, protones más neutrones, que tienen en su núcleo). Cada núcleo posee dos electrones a su servicio para equilibrar la doble carga positiva de los dos protones, pero los electrones son como los objetos que utilizamos cotidianamente, que no pueden estar en dos lugares a un mismo tiempo, de modo que ocupan diferentes posiciones al rodear el núcleo.

Cuando pasamos al siguiente elemento, el litio, vemos que las cosas se hacen más interesantes. El isótopo más común del litio contiene tres protones y cuatro neutrones en su núcleo (por ello recibe el nombre de litio-7), y cada núcleo está rodeado por dos electrones. Pero sucede que tres electrones ocupando los niveles más próximos al núcleo agotan todo el espacio disponible; no cabe un tercero, de modo que el electrón sobrante tiene que pasar a otro nivel, más alejado del centro. Ahí ocurre que hay mucho más espacio, y no menos de siete electrones caben al lado de ese tercero (por tanto, un total de ocho, todos más o menos a la misma distancia del núcleo) antes de que el siguiente tenga que pasar ya a un nivel más alejado todavía. En

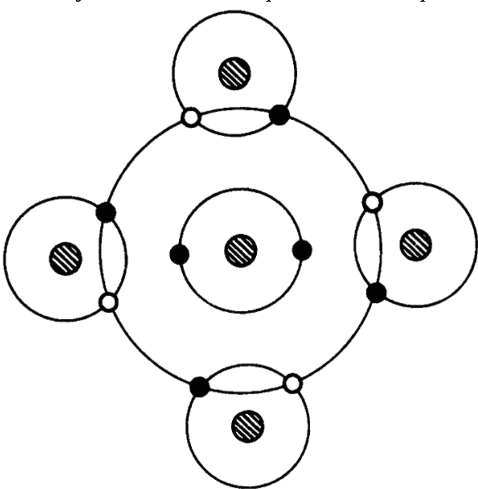
ello consiste la complejidad de los elementos químicos; por cada protón extra en un núcleo, debe haber, dondequiera, un electrón extra, intentando colocarse en el nivel más estable posible. De manera que cuanto más grande sea el átomo, más electrones tendrán cabida, mientras que la propiedad química de los elementos dependerá en gran medida tanto del número de electrones, como, muy especialmente, de la cantidad de niveles alejados del núcleo, puesto que son éstos los que más fácilmente se interrelacionan con otros átomos.



Cómo se juntan los átomos de sodio y de cloro para constituir el cloruro sódico, o sal común. El único electrón de la capa exterior de un átomo de sodio puede ser insertado en el único hueco existente en la capa más externa de un átomo de cloro. Esto origina una carga positiva en el ion sodio resultante y una negativa en el ion cloro. Ambos iones se unen como consecuencia de la atracción electrostática entre las cargas positiva y negativa.

Con esta base de física atómica resulta algo más sencillo comprender la química, y, en particular, entender cómo se forman los componentes químicos. La clave de la construcción de moléculas —combinaciones de átomos— está en los electrones de los niveles más alejados del núcleo. Por razones que no vamos a explicar aquí, pero que tienen que ver con la mecánica cuántica, los niveles más distantes están ocupados por los electrones más estables, donde los átomos se combinan para crear moléculas en un intento de llegar a ese estado particularmente

estable. Para el hidrógeno, con un solo electrón, pero con espacio para dos, ello se consigue mediante la unión de dos átomos que forman la molécula de hidrógeno, H_2. Cada núcleo comparte dos electrones en vez de uno, y esto produce la ilusión de que ambos niveles están ocupados. El helio, por su parte, está conforme con sus dos electrones y no se encuentra muy predispuesto a ganar más, a causa de lo cual resulta una sustancia bastante inerte, y es difícil hacer que reaccione químicamente.



Cuando el hidrógeno se une al carbono para formar moléculas de metano, resulta más correcto pensar que los electrones exteriores son compartidos, que pensar que son intercambiados de uno a otro átomo. En este enlace covalente, cada uno de los cuatro pares de electrones es compartido entre el átomo central de carbono y uno de los cuatro átomos de hidrógeno. El resultado es una molécula de metano.

Estos elementos simples son casos especiales, debido precisamente a su propia sencillez. En cuanto a las moléculas de la vida, pueden comprenderse mejor con un ejemplo de algún elemento pesado, y el ejemplo clásico es el de la sal común. Cada átomo de sodio tiene once electrones, que ocupan los niveles más próximos (dos) y los inmediatamente siguientes (ocho electrones), dejando un electrón suelto para que ocupe

un nivel más atrasado. El cloro, por otra parte, tiene diecisiete electrones, que ocupan los niveles más próximos (2+8=10 electrones), dejando siete electrones para un nivel más atrasado, que en teoría debería contener ocho. De modo que el sodio y el cloro guardan una gran afinidad; el electrón sobrante del sodio puede caber muy bien en el último nivel del cloro, y la familia de electrones (al menos los ocho más alejados) es compartida por dos núcleos, que juntos forman una estable molécula de cloruro sódico, NaCl. (“Na”, porque ya se usa la letra “S” para el azufre, y los químicos recurren entonces a las abreviaturas del griego y del latín para evitar confusiones.) Una forma de explicar lo que ocurre consiste en decir que el átomo de sodio cede literalmente su electrón al átomo de cloro; esto dejaría una carga eléctrica neta de +1 a lo que queda del átomo de sodio incompleto (al que se llama ion de sodio), y una carga neta global de –1 al ion de cloro correspondiente. Ambos permanecerían unidos por la atracción electrostática. Es una buena forma de entender lo que ocurre, pero —aunque no falten quienes así lo afirman— prefiero el concepto de los electrones más alejados compartidos por dos átomos, que se acerca más a la idea de electrones entendidos como ondas[34].

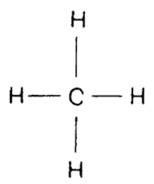
El calcio es muy semejante al sodio, pero tiene dos electrones “de reserva”, que puede prestar a un par de átomos de cloro, para crear cloruro de calcio, $CaCl_2$. Y así podríamos seguir haciendo “compuestos” químicos. Pero hay un elemento que constituye un caso muy singular, con una marcada habilidad para la creación de compuestos con otros elementos, lo cual ha motivado que, en química, su estudio sea una disciplina científica independiente. Este elemento es el carbono, y la química

[34] Los químicos sí que distinguen hoy entre casos donde los electrones son definitivamente compartidos, como es el de las moléculas de hidrógeno, y casos en los que no es así, como, por ejemplo, en el de la sal común. Pero la distinción no es muy importante aquí. Lo que cuenta es que al intentar los átomos completar sus niveles más alejados del núcleo de forma estable, éstos tienden a retener los electrones “sobrantes”, y que al compartir los electrones, los átomos se unen para formar moléculas.

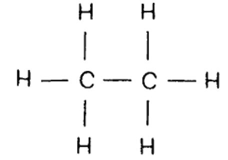
del carbono recibe el nombre de química orgánica, la cual está en íntima relación con la vida.

QUÍMICA DEL CARBONO

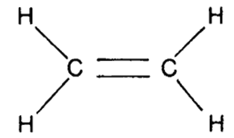
El carbono es especial porque posee seis electrones, dos de ellos pegados al núcleo y los otros cuatro en un segundo nivel, donde la cantidad ideal es ocho. Por ello, con la mitad de los niveles vacíos, el carbono tiene muchas posibilidades para la actividad química. No le importa "ceder" electrones a otros elementos hasta quedarse vacío (formando componentes como el metano, CH_4), como tampoco "recibirlos" hasta ocupar sus niveles vacantes. O, como a mí me gusta decirlo, el carbono tiene cuatro electrones para *prestar;* si sólo tuviera tres, sólo prestaría tres; con cinco, buscaría tres más. Este modo que tienen los átomos de ligarse unos con otros se denomina enlace, y la idea puede entenderse a la perfección dibujando las moléculas con líneas que representen los enlaces, líneas que apuntan hacia los símbolos de los diferentes átomos. Así, el metano, CH_4, se representa por:



que nos muestra claramente un átomo de carbono rodeado por cuatro átomos de hidrógeno, cada uno de los cuales comparte un par de electrones. Pero el carbono puede combinarse con otros átomos de carbono formando, por ejemplo, etano, C_2H_6:



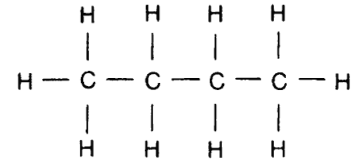
o incluso etano, C_2H_4, en el que se ven compartidos cuatro electrones (dos enlaces) entre cada uno de los átomos de carbono y un par de átomos de hidrógeno:



Esta clase de doble enlace no es, de hecho, más fuerte que un enlace único; si lo fuera, el carbono estaría tan conforme como las moléculas C_2:



Los electrones compartidos están demasiado localizados en un doble enlace, rozando unos con otros, y si hay hidrógeno disponible el eteno tenderá a convertirse en etano. El enlace de carbono simple, sea como fuere, es del todo satisfactorio, y cadenas enteras de átomos de carbono pueden organizarse de este modo para constituir moléculas complejas como el C_4H_{10}:



y así sucesivamente. Estas cadenas pueden encorvarse hasta formar un anillo (el más estable contiene seis átomos de carbono "de la mano" con otros átomos que han encontrado fuera del anillo) o pueden extenderse formando una "espina" con cientos y cientos de átomos de carbono, con una gran variedad de otra clase de átomos que estaban fuera de la espina y se han añadido a ella. (Sólo he mencionado los enlaces de carbono e hidrógeno por no complicar más las cosas; pero cualesquiera de los átomos de hidrógeno pueden ser sustituidos por otros átomos que necesiten un electrón, o un átomo con capacidad para establecer más enlaces puede reemplazar un átomo de hidrógeno, como en el caso del HCN:

H — C ≡ N

y así sucesivamente.) La química de la vida viene a ser la química del carbono, y, en particular, la química de cadenas de carbono muy largas, con curiosos materiales incrustados en la misma. Ahora bien —he aquí la gran pregunta—, ¿qué queremos significar con la palabra "vida"?

¿QUÉ ES LA VIDA?

La mejor y más simple distinción entre los seres que viven y los que no consiste en la posibilidad que tienen los primeros de reproducirse, de hacer copias de sí mismos. Esta distinción sirve tanto en lo relativo a nuestra cotidianidad (un árbol está vivo; una roca no) como en el ámbito molecular, donde la vida comienza, donde se inicia el proceso de reproducción de un árbol, de un ser humano o una ameba. La vida empezó cuando —de alguna manera, en algún lugar— una combinación de reacciones químicas produjo una molécula capaz de hacer copias de sí misma, provocando para ello otras reacciones químicas. Desde entonces, la historia de la vida —la evolución— ha sido una especie de competición entre diferentes formas de vida, ya para obtener el "alimento" indispensable (los elementos químicos y los componentes necesarios para hacer copias), ya para protegerse. Las moléculas fundamentales de la vida se protegen dentro de una pared de material, formando células individuales, y varios millones de células juntas conforman un ser humano o un árbol. Cómo sucedió esto lo veremos en el próximo capítulo. Pero cómo y cuándo se originó la vida será el objeto de éste, después de varias décadas de espera de que apareciera una teoría suficientemente sólida.

En efecto, la teoría convencional sobre el origen de la vida comenzó su desarrollo hace casi medio siglo con la sugerencia de J. B. S. Haldane de que las moléculas orgánicas correctas (componentes de carbono) se desarrollaron lentamente en los océanos a lo largo de un dilatado período geológico, hasta que

la complejidad de los componentes, productos de las reacciones químicas, hizo que al fin surgieran las primeras moléculas que ahora llamamos de la vida. (Es muy probable que sólo haya existido una única "primera molécula viviente" de la cual haya descendido todo lo demás.) Fue Haldane quien por primera vez describió el océano como rico en materia orgánica, y su nombre ha quedado vinculado a ello, a pesar de que un científico ruso, A. I. Oparin, sugirió por el mismo tiempo, pero de manera independiente, una teoría similar, si bien postulaba que las primeras moléculas de la vida aparecieron en las zonas volcánicas, más que en los océanos. Una cuestión obvia es la de que, por definición, no pudo haber ningún género de vida que interfiriese en el proceso. Si las complejas moléculas de la vida fueran creadas en los océanos actuales, a buen seguro se convertirían en el alimento de otras criaturas vivientes. La vida está constantemente absorbiendo moléculas simples, como las de hidrógeno, carbono y oxígeno, que se combinan entre sí para dar lugar a otras moléculas vivas. Pero cuando no había vida, podían ser creadas poco a poco, sin ninguna interferencia, y la primera molécula "viviente" debió de tener todo un mundo (o un océano) de comida a su disposición. ¿Cuán complicada es una molécula de vida? Bien, *puede* serlo en grado sumo, cierto, como nos muestra el ejemplo de la hemoglobina, que transporta oxígeno a través de nuestra sangre[35].

La hemoglobina es una molécula muy compleja, perteneciente a la familia de las sustancias que llamamos proteínas, y que está constituida por cadenas de moléculas menores, llamadas aminoácidos, asociadas de un modo especial que sólo se da en la hemoglobina. Cada aminoácido contiene unas docenas de átomos dispuestos según el modelo de la espina de carbono, y en cada molécula de hemoglobina hay exactamente 574 moléculas de aminoácidos que constituyen cuatro cadenas principales, entrelazadas unas con otras hasta conseguir su forma típica,

---

[35] He tomado este ejemplo del libro de Richard Dawkins, *El gen egoísta* (Salvat Editores, S.A. Barcelona 1986), que recomiendo a cualquier persona que desee profundizar en el misterio de la evolución de la vida.

«una especie de denso espino», según la describió Richard Dawkins. Un ser humano con una salud normal tiene unos 6.000 millones de millones de millones (es decir, 6×10^{21}) de moléculas de hemoglobina, todas ellas idénticas, con 400 millones de millones (4×10^{14}) de ellas que son destruidas cada segundo y, de inmediato, reemplazadas por otras tantas nuevas, creadas por el mismo cuerpo e iguales por completo a las anteriores. Es evidente que el cuerpo humano no funciona mediante el proceso de reacciones químicas provocadas por el azar cuando elabora dichas moléculas; lo que ocurre, más bien, es que el cuerpo selecciona materias químicas de entre lo que tenga más a mano (léase alimentos) y las utiliza de una manera muy determinada. Y también es evidente que si el azar produjo reacciones químicas en la primitiva Tierra o en los océanos, en todo caso no originaron moléculas tan complicadas como la de la hemoglobina, sino otras más simples: sin más, células con vida. Aunque hubiéramos esperado durante toda la historia de la Tierra, unos 4.500 millones de años, nunca se hubiera producido sólo por azar una molécula tan complicada como la hemoglobina.

Esto no quiere decir que una mano misteriosa colocara los elementos químicos en el lugar adecuado para que apareciera. Tan pronto como surgieron las moléculas con capacidad de reproducción —moléculas con vida propia—, las reacciones en las que se vieron envueltas dejaron de producirse por azar. Una nueva ley natural empezó a regir: la evolución de las moléculas con vida se aceleró espectacularmente gracias al proceso de selección natural. “Eficientes máquinas de hacer réplicas” pronto entraron en funcionamiento para replicar dichas moléculas a partir de las materias primas disponibles. Este proceso debió de repetirse muchas veces antes de que la creación de seres humanos y moléculas de hemoglobina se hiciera posible, pero también es cierto que la naturaleza dispuso de mucho tiempo para llevar a cabo este proceso de selección natural. Muchas personas, cuando piensan en la evolución, creen que es algo que sólo ocurre con familias enteras de animales o plantas, nunca con moléculas individuales. Sin embargo, las leyes de la

selección natural que alientan la evolución molecular son las mismas que gobiernan el proceso de evolución de las especies en la actualidad, y de hecho, todavía hoy, la evolución continúa en el nivel molecular. Los genes que portamos en nuestras células y que determinan la clase de personas que somos físicamente (y, hasta cierto punto, también mentalmente) son eficientes moléculas replicadoras que viven escondidas dentro de lo que Dawkins llama su "máquina de supervivencia". Una vez las células se desarrollaron, los genes fueron a la vez protegidos y forzados a manipular sus alrededores por control remoto; a partir de entonces, la historia de la vida se transforma en la historia de la "vida tal como ahora la conocemos". Pero, ¿cómo se llegó al punto en que las células fueron "inventadas"?[36].

QUÍMICA EN EL ESPACIO

De los estudios astronómicos realizados durante los años sesenta y setenta, una cosa ha quedado clara: el "caldo primitivo" arrancó, probablemente, con una mezcla química algo más complicada que la de agua, dióxido de carbono, metano y amoniaco, tal como se podría desprender de las teorías de Haldane y Oparin. Algunos químicos han seguido la idea de los científicos mencionados con experimentos en los cuales mezclas de estos componentes químicos, o de algunos de ellos, son tratadas con radiación ultravioleta (para simular la energía del

---

[36] No quiero decir con esta pregunta que hubiera una intención deliberada de crear tales células por parte de las moléculas; sucedió de forma casual, con la ayuda de la selección natural. No obstante, como habrá podido advertir el lector atento, no tengo ningún inconveniente en acudir a una descripción antropomórfica siempre que sea preciso para dar a entender mejor los conceptos. Es más fácil decir que las células "fueron inventadas" que explicar que «las paredes de las células aparecieron como resultado de una compleja cadena de beneficiosas mutaciones y que pronto dominaron la vida en la Tierra». A pesar del modo en que yo narre los hechos, al comienzo de mi versión de la historia de la vida, sin duda alguna, no concurre participación de seres inteligentes en el origen de la vida sobre la Tierra antes de que apareciera en escena nuestro inmediato antecesor.

Sol), o con chispas eléctricas (para simular la energía de las tormentas eléctricas en la atmósfera de la joven Tierra). En 1953, Stanley Miller mostró que, tratando las mezclas de hidrógeno, metano, agua y amoniaco con esta técnica durante una semana, se producía alrededor de un 3% de aminoácidos (recuérdese la forma en que estaba construida la hemoglobina; este sistema de construcción se repite en otra clase de componentes) en dichas mezclas. Más recientemente, experimentos similares han dado como resultado unas moléculas de vida de mayor complejidad. Los componentes sencillos más la energía destinada a estimular reacciones químicas han dado lugar a moléculas de vida, o al menos a "precursores de la vida". Pero la naturaleza, como ahora sabemos, ni siquiera necesitaba un planeta para crear estos precursores de la vida, puesto que los componentes sencillos referidos están presentes en el espacio, dentro de las nubes interestelares de gas y polvo, desde donde pueden recibir energía proveniente de una estrella próxima. Algunos han apuntado que "componentes simples + energía = precursores de vida", pero los teóricos han seguido viendo las nubes interestelares como lugares fríos y oscuros, llenos de compuestos simples —hidrógeno molecular, tal vez— y elementos —por ejemplo, carbono—, hasta que las observaciones les han hecho reparar en que las nubes son lugares mucho más interesantes de lo que creían.

Quizá sea éste el momento más adecuado para recapacitar con brevedad sobre todo lo dicho hasta ahora. Después del *Big Bang* de la creación, el Universo contenía nubes de gas caliente agrupadas jerárquicamente como consecuencia de los procesos físicos que dominaron los últimos instantes del período de la bola de fuego. Estas nubes estaban compuestas por una gran cantidad de hidrógeno, una proporción menor de helio y prácticamente nada más. La mayor parte de la materia de esas nubes pronto se condensó para formar estrellas, apareciendo así supergalaxias diez o veinte veces mayores que las galaxias de estrellas brillantes que hoy conocemos. Estas nubes quemaron el combustible nuclear de sus interiores, con lo cual convirtieron el hidrógeno y el helio en unos núcleos más complejos, debido

al proceso de fusión nuclear. Cuando la primera generación de estrellas empezó a aparecer, los restos del gas residual —quizá sólo el 10% de la masa de cada supergalaxia— se establecieron, bajo el influjo de la gravedad, en lo que conocemos como galaxias espirales. En algunas galaxias, las colisiones han deformado el esquema original, por lo que hoy podemos ver una gran variedad de galaxias a nuestro alrededor, con dos familias principales: las espirales y las elípticas. Nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, no obstante, parece haber tenido más interacciones de este tipo, y ha permanecido como una espiral.

Dentro de esta galaxia espiral, el proceso de la formación de estrellas, la síntesis nuclear y las explosiones estelares han proseguido. De modo que entre las estrellas existen nubes ricas en elementos producidos en el interior de las mismas estrellas por síntesis nuclear, incluyendo carbono, nitrógeno y oxígeno, así como también una importante cantidad de hidrógeno sin procesar (en realidad, supone mucho a nivel humano, pero es insignificante, tan sólo un residuo, dentro de la abundancia original de nuestra supergalaxia). Por ello, no constituyó ninguna sorpresa para los astrónomos dar con pruebas evidentes de la presencia de tal variedad de elementos atómicos, junto con algunos compuestos simples, como el CN o el OH (OH no es sino el radical hidroxilo, no una molécula propiamente dicha; al oxígeno le "apetecería" disponer de otro átomo de hidrógeno, para formar H_2O, o sea, agua, pero se conforma con uno al no poder conseguir ninguno más). Si cualquier elemento procedente de una nube interestelar puede integrarse en un nuevo sistema solar —el nuestro se ha formado así—, parece entonces razonable creer en la posibilidad de que tales compuestos y elementos sean el punto de partida de la evolución de la vida en la Tierra[37].

[37] Me gustan las referencias astronómicas de la canción *Woodstock*, cuando dice que estamos hechos de «polvo de estrella y carbono de hace un billón de años», puesto que es literalmente conecto que cualquier cosa de nuestros cuerpos, excepto el hidrógeno, se ha producido en el interior de, al menos, una estrella, y, como mínimo, de hace un billón (mil millones) de años. El hidrógeno ha llevado una existencia más monótona, a pesar de que en algunos casos

Aquí se detuvieron los estudios en 1968. Los astrónomos sabían de la existencia de varios elementos y unos pocos compuestos simples en el interior de las nubes interestelares; los bioquímicos los aceptaron como participantes que tomaban parte en el proceso que desarrolló la vida en la Tierra, mientras que diversos experimentos mostraban que los precursores de la vida podían ser creados por medio de la introducción de energía en un sistema cerrado compuesto en exclusiva por componentes simples. Fue entonces cuando Charles Townes, premio Nobel de Física, entró en la escena de la astronomía. Townes estaba interesado en la radioastronomía de longitudes de onda cortas, longitudes de onda llamadas microondas, muy utilizadas en sistemas de comunicación, radares, etc. Estas longitudes de onda son justo las longitudes en las que moléculas complejas producen o absorben radiación electromagnética. Este proceso constituye la versión electromagnética de lo que provoca la resonancia de una cuerda de guitarra, y lo mismo que una cuerda corta produce una nota alta (es decir, un sonido de longitud de onda corta), una molécula pequeña resuena con una longitud de onda corta de radiación electromagnética. Los átomos individuales son, efectivamente, tan pequeños que "resuenan" con ondas ligeras, y esto es lo que produce las líneas que se distinguen en su espectro: una línea oscura en la longitud de onda precisa muestra una luz que es absorbida por los átomos de un elemento; una línea clara en otro lugar muestra una luz que es radiada por los átomos de otro elemento. De modo equivalente se comportan las moléculas grandes, pero en un espectro de microondas.

Hay dos problemas, no obstante, cuando se buscan las moléculas complejas por medio de radiotelescopios en el espacio. En primer lugar, cuanto más corta sea la longitud de onda, tanto más perfecto deberá ser el sistema de antena y receptor. Dicho

ha tenido relación con reacciones nucleares dentro de alguna estrella y ha sido expulsado fuera de la misma otra vez, pasando a formar parte de la Tierra, y, posteriormente, de nuestros cuerpos, sin cambiar desde los tiempos del *Big Bang*.

de una forma sencilla, si alguien está buscando radiación con una longitud de onda de un centímetro, deberá hacerlo con una antena cuya superficie sea sensible a este centímetro o, de lo contrario, la radiación será desviada hacia cualquier otra dirección. Los telescopios ópticos deben ser suaves comparados con la longitud de onda de la luz. Es difícil hacer un telescopio así; una antena de microondas es un compromiso entre su tamaño y su sensibilidad. Por su parte, el receptor debe ser capaz de captar una señal débil sin destrozar la información que contiene, y no fue hasta los años sesenta cuando pudieron desarrollarse los sistemas antena-receptor adecuados para este trabajo. Ello fue posible, en gran medida, gracias al perfeccionamiento de los satélites de comunicación. (Penzias y Wilson, otros dos ganadores del premio Nobel, fueron los pioneros en el descubrimiento del campo cósmico de radiación de microondas utilizando un sistema de satélites de comunicación construidos ex profeso para la ocasión.)

Y el segundo problema, que lo sigue siendo (aunque no tanto como en 1968), es que, si bien las "líneas" de radio de microondas pueden identificar las moléculas como si se tratara de huellas digitales de una persona, antes es menester "tomar las huellas digitales" a fin de ver en el laboratorio cuáles son los componentes apropiados y de estudiar su espectro de microondas. Cuantos más átomos contenga una molécula, más resonancias electromagnéticas pueden darse, haciendo que las huellas sean claras, pero también haciendo tedioso el trabajo de medirlas.

No fue hasta que se descubrieron algunas moléculas complejas en el espacio, cuando el esfuerzo de identificar otras parecía vano; nadie quiere perder el tiempo en un laboratorio determinando las huellas de las microondas de una molécula para luego, en las observaciones, darse cuenta de que aquella molécula no existe. En consecuencia, cuando un equipo de Berkeley, inspirado por Townes, se colocó tras su pista, empezaron siendo pocos. Pero con el éxito obtenido, consiguieron que otros se animaran a seguir el mismo camino, y, conforme se

descubrían más y más moléculas en el espacio, avanzaban los estudios.

Primero se descubrió el amoniaco (NH_3), identificado en diciembre de 1968 por su radiación en la longitud de onda de 1,26 cm.

Esto demostró que el sistema funcionaba. Poco después, el mismo equipo descubrió las huellas del agua en el espacio, y a principios de 1969 tuvo lugar el descubrimiento del formaldehído. El formaldehído no es una molécula compleja en el sentido que nosotros entendemos que son; es una molécula orgánica (H_2CO), uno de los componentes de la familia del carbono, y, en concreto, una de las moléculas que pueden fabricarse con facilidad añadiendo energía a una mezcla de componentes simples. Fue ésta una revelación, al menos para algunos astrónomos (iba a decir "astrofísicos", pero supongo que 1969 constituyó la fecha de partida de una nueva subdivisión de la astronomía: la "astroquímica"). Los componentes simples de las nubes interestelares más energía, podrían, con toda seguridad, hacer que los precursores de la vida fueran tan eficientes como en la Tierra, con la ventaja de que la edad de la Tierra es de 4.500 millones de años, mientras que la de las nubes interestelares tal vez sea de muchos miles de millones más, todo lo cual hace que el desarrollo de la vida goce de más posibilidades de las que ha gozado en la Tierra. Si la Tierra fue "sembrada" con productos químicos de esa complejidad en los primeros momentos de su historia (quizá debido al choque de los cométaselos cuáles contienen "materia prima" procedente del medio interestelar), los precursores de la vida pudieron estar presentes ya en el caldo primitivo, y no debieron de tardar mucho en comparecer los primitivos replicadores si comparamos el tiempo que requirieron con la edad de nuestro planeta.

¿VIDA DEL ESPACIO?

Docenas de moléculas poliatómicas han sido identificadas en el espacio[38], y casi todas ellas son componentes del carbono, por entero en la línea de la química del carbono y sus aptitudes para combinarse de diferentes maneras con otros elementos y consigo mismo. Algunas de estas moléculas —sin excluir el formaldehído— han sido detectadas en la radiación que nos ha llegado de otras galaxias, lo cual nos hace suponer que las complejas moléculas basadas en el carbono son muy comunes, no ya en la Tierra o en nuestra Galaxia, sino en todo el Universo[39].

De modo que la joven Tierra debe de haber estado siempre relacionada con moléculas tales como H_2CNH, HCCCN, H_3CCOH y otras; además, se sabe que algunas de estas moléculas, ya identificadas, tienen gran facilidad para combinarse con otras y construir así moléculas más complejas, y, en particular, ácido fórmico (HCOOH) y metanimina (H_2CHN), ambas identificadas en densas nubes del espacio y capaces de reaccionar hasta producir el más simple aminoácido: glicina (NH_2CH_2COOH). El formaldehído, descubrimiento clave en esta agitada investigación, es un componente común a otras moléculas orgánicas mayores, como el azúcar, que es esencial

---

38 En un artículo aparecido en *Nature* (febrero de 1980) y escrito por Mann y Williams, se daba una lista de noventa moléculas identificadas hasta aquel momento.

39 No puedo resistir la tentación de hablar de mí mismo y citar lo que escribí en uno de mis primeros libros. Our *Changing Universe,* publicado en 1976 y redactado justo cuando se estaban realizando estos descubrimientos: «Tal vez nunca podremos estar seguros de si hay vida inteligente en alguna otra parte del Universo, pero todo parece indicar que sí la hay. Lejos de ser nuestro planeta único en este aspecto, el descubrimiento de moléculas como el formaldehído en otras galaxias sugiere que incluso en la nuestra puede no ser insólita la existencia de otros planetas con vida inteligente. Es curioso y —para mí— reconfortante el hecho de que en la galaxia NGC2S3 haya vida basada en el carbono, con ADN en sus células, seres que estudian el cielo con sus telescopios y que quizás especulen sobre el significado de sus descubrimientos del formaldehído.»

para la vida. Es probable que incluso los aminoácidos estuvieran presentes en el caldo primitivo, idea que indujo a Jim Lovelock a decir que «parece como si el espacio fuera un almacén gigante en el que se guardaran las piezas necesarias para la vida»[40], y a desarrollar una curiosa comparación con un planeta totalmente compuesto por piezas de reloj. Prosiguiendo con la analogía, Lovelock imagina que al cabo de un tiempo bastante largo —quizá mil millones de años— la combinación de la energía de las mareas y del movimiento del viento permitirá montar al menos un reloj capaz de funcionar. Partiendo de que el planeta contiene abundantes componentes de la vida, las reacciones químicas producirán una molécula replicadora dentro de unos mil millones de años.

Las diferencias en las secuencias de reacciones químicas que produjeron las primeras réplicas son astronómicas, pero también lo era el tiempo disponible. Como Lovelock lo entiende, «la vida era algo con muy pocas posibilidades de producirse a pesar de las oportunidades casi infinitas que tenía de hacerlo», así es que se produjo por casualidad. Para el resto de mi explicación de dónde venimos, ésa, la explicación "establecida", es la adecuada. Lo que nos importa, a estas alturas, es que una réplica tomó forma, y a partir de ahí, se desencadenó la evolución que nos ha conducido hasta la gran variedad de modos de vida existente. Pero la explicación establecida todavía no es enteramente satisfactoria, y es natural que nos interroguemos acerca de lo que ha ocurrido durante tantos millones de años en el interior de las nubes interestelares. Por fortuna para los que nos formulamos estas preguntas, Fred Hoyle y Chandra Wickramasinghe han hecho más que imaginar respuestas, han elaborado una detallada teoría sobre cómo formas de vida genuinas —replicadores— pudieron establecerse en las nubes interestelares.

Todo ello hace que nuestras mentes se sorprendan, si bien en un sentido agradable. Si la clase de replicadores de los que

---

[40] Cita extraída del libro de Lovelock *Gaia: A New Look at Life* on *Earth.*

descendemos empezaron haciendo réplicas en las nubes interestelares, ello significa que la vida, cualquier clase de vida, proviene de los mismos replicadores. Cada uno puede *especular* como quiera sobre esta clase de ideas, pero Hoyle y Wickramasinghe han ido más lejos ofreciendo una explicación no sólo de cómo, sino también de por qué las condiciones en una nube interestelar pueden favorecer el desarrollo de los replicadores de vida. A pesar de que la teoría es nueva y será modificada —quizá drásticamente— a medida que se vayan haciendo nuevos descubrimientos, yo creo en su validez como descripción de los orígenes de la vida y (admitiendo que estoy predispuesto en su favor) la ofrezco aquí como la mejor respuesta disponible a la pregunta sobre la procedencia del primer replicador.

Gran parte del material que existe entre las estrellas es hidrógeno, verdadero material primitivo de la época de la bola de fuego. Pero el más obvio material existente entre las estrellas es el polvo, que podemos apreciar con nitidez en las fotografías astronómicas. Estas manchas de polvo bloquean, literalmente, la luz de las estrellas que tienen detrás, de modo que, muy a menudo, las manchas más densas aparecen como si fueran agujeros negros rodeados de estrellas muy brillantes; pero incluso donde no hay manchas de polvo lo bastante densas como para tapar la luz de algunas estrellas, éstas difícilmente podrán hacemos llegar su luz sin verse afectadas por las tenues regiones de polvo que acaso encuentren en su recorrido. Las longitudes de onda de luz más cortas —el borde azul del espectro— se dispersan más fácilmente por las pequeñas partículas de polvo, mientras que las longitudes de onda largas —el borde rojo del espectro— pueden atravesar una reunión de pequeñas partículas sin mayores consecuencias. De manera que la luz se manifestará más rojiza cuando pase a través de una nube de polvo en el espacio, o a través del polvo nebuloso de las capas más bajas de la atmósfera, como es el caso de las espectaculares puestas de sol[41].

[41] Este enrojecimiento no tiene nada que ver con los desplazamientos rojos de Doppler, que son los que cambian la longitud de onda de la luz proveniente de una galaxia. En efecto, puesto que algunos objetos distantes en el Universo,

Alrededor del 2% de la masa total de las nubes interestelares es polvo: el resto es hidrógeno más helio, que forman las vastas nubes que constituyen los lugares de nacimiento de las nuevas generaciones de estrellas. El polvo entre el material interestelar es producto de la nucleosíntesis que tuvo lugar en las primeras generaciones de estrellas, que —como sabemos— fabrican carbono, oxígeno y nitrógeno, de donde se deduce que los granos de polvo de las nubes interestelares están constituidos por combinaciones de esos elementos, entre sí o con el hidrógeno. (Recuérdese que el helio es muy estable, ni "necesita" electrones ni le sobran, y raramente reacciona.)

El grado de oscurecimiento de la luz de las estrellas muestra cuán grandes son las partículas de polvo que son causa de dicho oscurecimiento, y desde los años treinta se sabe que estas partículas de polvo deben ser granos diminutos, del tamaño de la longitud de onda de la luz visible. Ello se mide en angstroms (Å), y un centímetro es 100 millones de angstroms, mientras que la luz óptica cubre una banda de longitudes de onda de unos pocos miles de Å; de modo que el tamaño de un grano de polvo interestelar es menor que una cienmilésima parte de un centímetro.

Aun así, es importante saber apreciar qué proporción de este material interestelar hay en nuestra Galaxia. Incluyendo todo el gas, la materia interestelar representa alrededor de una décima parte de la masa de la Galaxia, que es 10.000 millones (10^{10}) de veces la de nuestro Sol[42]. El 2% de esto no deja de ser

---

como los quasars, producen una gran cantidad de energía en la banda ultravioleta del espectro, que normalmente es invisible, y los desplazamientos rojos empujan dicha energía hacia la banda azul del espectro óptico, la Íu2 de un quasar con un desplazamiento rojo alto se manifiesta muy a menudo como azul, y éste es uno de los medios que tienen los astrónomos de buscar quasars desconocidos: detectando en las placas fotográficas los objetos intensamente azulados en forma de estrella. El color rojo de la luz del polvo estelar se debe a que el componente azul ha experimentado una dispersión, por lo que domina el rojo en el resto del espectro.

[42] Me refiero, por supuesto, a las brillantes estrellas de la Vía Láctea que nos son familiares gracias a las fotografías, que son sólo una décima parte de la masa de la supergalaxia en la cual, según los últimos descubrimientos, nuestra

una impresionante cantidad de 200 millones de masas solares de material esparcidas por toda la Galaxia.

Desde los años treinta, las observaciones del grado de oscurecimiento que tiene lugar a diferentes longitudes de onda —el grado y la naturaleza del enrojecimiento— se han extendido y desarrollado, y, en la actualidad, incluso se hacen mediciones de la absorción por la radiación interestelar tras el espectro óptico, a longitudes de onda infrarrojas y ultravioletas. Parece ser que la absorción más fuerte (medida por instrumentos instalados en cohetes y satélites lanzados más allá de la atmósfera de la Tierra, la cual al mismo tiempo bloquea la luz ultravioleta) es de unos 2.200 Å, en la banda ultravioleta del espectro.

Antes de que tal descubrimiento se produjera hacia mediados los años sesenta, la explicación más corriente de la naturaleza de los granos interestelares era la de que éstos eran como partículas de hielo, una especie de "nieve" compuesta de agua, metano y amoniaco congelados. Pero ya antes de que las mediciones ultravioletas se conocieran, Hoyle y Wickramasinghe imaginaban que era muy difícil la formación de hielo o nieve en el espacio, y que era mucho más sencillo obtener nubes de polvo a base de diminutas partículas de carbono (hollín).

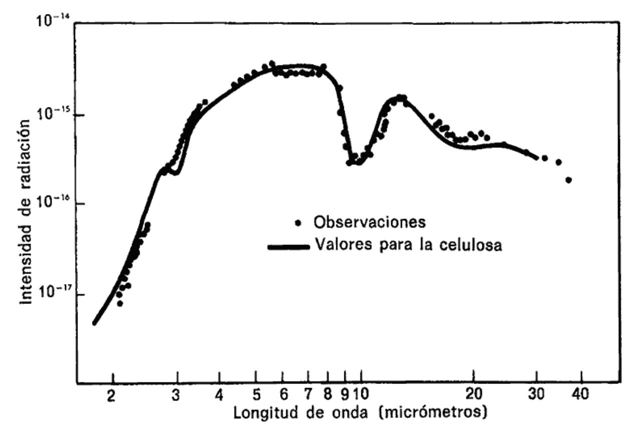
Esto puede parecer extraño. Pero el carbono es uno de los productos más importantes de la nucleosíntesis estelar, y hay una serie de estrellas llamadas estrellas de carbono cuyos espectros muestran unas atmósferas muy ricas en este elemento[43]. Todas las estrellas pierden constantemente materia de sus atmósferas, y a las estrellas variables puede imputárseles el viento estelar, con el mismo ciclo periódico que el de sus variaciones de brillo. De modo que Hoyle y Wickramasinghe fueron los primeros en elaborar el esquema gráfico de las estrellas

---

Galaxia está inserta.

[43] Aunque digamos que existe una categoría de estrellas a las que podemos denominar "estrellas de carbono", no quiere esto decir que sean una excepción, porque hoy sabemos que cualesquiera estrellas tienen una fase en la cual son verdaderas estrellas de carbono, aunque sólo unas pocas sean visibles para nosotros.

de hollín que desprenden carbono al espacio, una idea que luego se reafirmó gracias a observaciones que revelaron la existencia de características propias del grafito (partículas ordinarias, como las que hay en un lápiz) en la radiación de las estrellas de carbono.



Para consternación y —también hay que decirlo— incredulidad de la comunidad astronómica, Fred Hoyle y Chandra Wickramasinghe han presentado evidencias de que incluso una molécula orgánica tan compleja como la celulosa puede existir en nubes en el espacio. Las observaciones de absorción por las nubes interestelares en las longitudes de onda infrarrojas coinciden exactamente con la curva teórica calculada para la celulosa. ¿Se trata de una coincidencia?

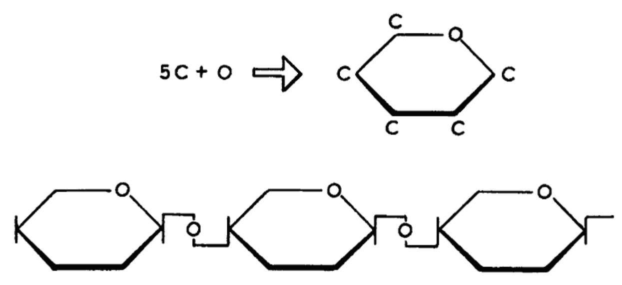
El descubrimiento de la fuerte absorción a 2.200 Å hace que tengamos que desechar de raíz la hipótesis del hielo interestelar, puesto que ninguno de los tres candidatos (hielo de agua, hielo de amoniaco o hielo de metano) puede bloquear una radiación demasiado fuerte en su longitud de onda[44]. En cambio, el carbono sí puede, tanto, que algunos astrónomos arguyen

[44] Observaciones realizadas con posterioridad han mostrado una ausencia de absorción donde el hielo "debería" de afectar a la luz que nos llega, y. por otra parte, la radiación infrarroja indica que las temperaturas en muchas nubes interestelares están por encima del punto de ebullición del agua. ¡Tan clara parece ser la explicación!

que con sólo los granos de carbono se justifica el enrojecimiento interestelar. Pero también tiene que haber nitrógeno y oxígeno en las nubes. Tiene que haber moléculas, y Hoyle y Wickramasinghe han señalado cuáles son las que mejor explican las observaciones, y cómo se han formado.

Llegados a este punto, la historia que nos ocupa pasa a convertirse en la historia de los estudios de las radiaciones infrarrojas de las nubes de polvo y gas, que son las que se condensan y crean las estrellas, o bien de las "formaciones" de material polvoriento que rodean las jóvenes estrellas. Éstas son calentadas por la energía proveniente de las estrellas recién creadas o en formación, lo cual produce una fuerte radiación infrarroja. El punto álgido de la radiación tiene lugar en la frecuencia que corresponde tanto a la actual temperatura de la nube como a la naturaleza de las partículas de dicha nube, en la jerga de los físicos, a la curva subyacente del cuerpo opaco (¿recuerdan el fondo de 3°K? Esta radiación también presenta características de opacidad, aunque a temperaturas de cientos de °K) se superpone la figura de la emisión espectral de las partículas.

Cuando aumentan tanto los infrarrojos como la longitud de onda, la tradicional unidad angstrom se vuelve inoperante, y los astrónomos prefieren utilizar el micrómetro (un micrómetro equivale a una millonésima parte de metro, 10^{-6} m), que es, en cualquier caso, una unidad más lógica y más directamente ligada al sistema métrico. Puesto que un micrómetro es una millonésima parte de un metro, un angstrom es una diez mil millonésima parte de un metro (10^{-10} m), de modo que hay 10.000 Å en cada micrómetro, que en Å nos daría un número superior a 100.000, así es que nos quedaremos, de ahora en adelante, con los micrómetros. (Pero si el lector lo prefiere, los puede convertir en Å con sólo añadirle cuatro ceros a la cifra que se dé en micrómetros.)



La relativamente simple molécula en forma de anillo constituida por cinco átomos de carbono y uno de oxígeno, el anillo piránico, tiende a producir réplicas de sí misma, unidas por átomos de oxígeno adicionales para constituir el esqueleto de una cadena de polisacárido, si existen más átomos de carbono y de oxígeno disponibles. Esta forma de molécula compleja, ni mucho menos viviente, podría construirse con facilidad en las condiciones que sabemos existen en las nubes interestelares.

Tres rasgos predominaron en el espectro de las nubes calientes de material polvoriento asociado al nacimiento de las estrellas. Éstas fueron de dos a cuatro micrómetros, de ocho a doce y, la tercera, de alrededor de unos dieciocho. Diversas teorías han procurado explicarlo argumentando que, en realidad, se trata de tres familias diferentes de componentes químicos, incluyendo variaciones sobre la idea del agua-hielo y la presencia de silicatos. Pero, en busca de la posibilidad más sencilla, Hoyle y Wickramasinghe intentaron encontrar una sustancia que valiera para todos los casos. Para su propio asombro —y consternación de muchos otros astrónomos y bioquímicos— encontraron el candidato ideal: la celulosa, que no es sino la más abundante materia orgánica de la Tierra, y una parte fundamental de la estructura de las plantas.

¿VIDA EN EL ESPACIO?

Llegados a este punto, hay que decir que muchos astrónomos (y bioquímicos) juzgaron la idea de la celulosa simplemente inaceptable, y que otras teorías (un poco discutidas, pero que funcionan) todavía se tienen en cuenta para explicar las

observaciones infrarrojas. La hipótesis Hoyle-Wickramasinghe no está del todo establecida, pero nos ofrece la explicación más completa de lo que está sucediendo en las nubes de polvo del espacio, y estoy convencido de que, aunque algunos pormenores sean modificados, a medida que se vayan haciendo nuevos descubrimientos, mucho de lo que se diga en estas líneas quedará establecido de manera definitiva. La celulosa misma es miembro de una familia de moléculas llamadas polisacáridos y, en una redefinición algo más exacta de su propia idea, Hoyle y Wickramasinghe han probado que las observaciones infrarrojas de este tipo pueden explicarse mediante la combinación de polisacáridos (siempre la *misma* combinación de polisacáridos) a los que se unen algunos hidrocarburos (compuestos de carbono y de hidrógeno, o sea, lo que se supone que se ha de encontrar en una nube de hidrógeno que contuviera granos de carbono). ¿Cómo pudo, por tanto, una molécula con una estructura tan compleja surgir sujeta a las condiciones del espacio interestelar?

Como acabo de apuntar, es evidente que las condiciones necesarias para el desarrollo de la química prebiológica se dan en los restos del material de polvo caliente tras la explosión de las estrellas jóvenes. Este polvo proviene, es claro, de una generación *previa* de actividad estelar, y es el material residual de la nube de la cual se ha formado una constelación de nuevas estrellas. La energía de la radiación de la estrella o estrellas mantiene el carbono y el oxígeno en el centro de la nube, principalmente en la forma de átomos simples, ya que una fuerte radiación puede disgregar cualquier molécula (como la de monóxido de carbono, CO) que intente formarse. Pero, donde la temperatura desciende por debajo de los 1.200°K, el carbono y el oxígeno pueden unirse, no como monóxido de carbono, pero sí en cadenas formadas a partir del anillo de pirano, estando cada uno de estos anillos constituido por cinco átomos de carbono y uno de oxígeno, que se “dan la mano” en un círculo (C_5O). Un anillo de pirano se une fácilmente a otro a través de un átomo de oxígeno sobrante que se une a uno de los carbonos de cada anillo, y una cadena de anillos de pirano unidos de esa

forma constituye la estructura básica de un polisacárido. Y aunque sea pesado este modo de formar semejante cadena, juntando los átomos unos a otros, una vez que está creado, el anillo de pirano muestra una de las cualidades fundamentales de la vida: actúa como pauta o modelo, que facilita la formación de más anillos, los cuales se juntan para formar una cadena que va creciendo. Cuando la cadena se separa en dos o más partes, cada una de ellas sigue creciendo, tomando carbono y oxígeno de la combinación química que la rodea, para formar más anillos de pirano. Y aunque nadie pretendería que un simple anillo de pirano tiene vida (se comporta más bien de la misma forma que un cristal que estuviera creciendo: en presencia de una combinación adecuada de elementos químicos, los aglutinará como una extensión de sí mismo, pero sin manipular su entorno disgregando otros compuestos moleculares y reordenándolos en unidades distintas, capaces de reproducirse), sí actúa de tal modo que, en las debidas condiciones, una gran parte del carbono y del oxígeno disponibles se transformará en polisacáridos, al igual que, en condiciones favorables, una gran parte del carbono, del nitrógeno y del oxígeno de la Tierra se ha transformado en células vivas.

¿Dónde está, en las nubes interestelares, el nitrógeno que tiene que existir si nuestros conocimientos de nucleosíntesis estelar son correctos? De vuelta a la luz enrojecida que nos llega de las nubes de polvo heladas procedentes del espacio —nubes heladas que, presumiblemente, incluyen material expulsado de estrellas jóvenes, en las cuales el proceso de fabricación de polisacáridos ha tenido lugar—, todavía hay muchos rasgos espectrales inexplicados. Uno de ellos, el más notable, se encuentra en una banda de unos 4.430 Å y se extiende sobre unos 30 Å. La extensión de este rasgo indica, de una forma inequívoca, el tamaño de las moléculas que lo producen —los átomos dibujan líneas definidas, mientras que las moléculas forman amplias figuras espectrales—, y ello puede ser explicado por la presencia de una molécula particularmente larga, $MgC_{46}H_{30}N_6$, u otra similar, la porfirina. ¿Y dónde se halla?

Las porfirinas son parte del material de fabricación de la incluso más compleja clorofila, involucrada en la fotosíntesis, el proceso por el cual las plantas transforman la energía de la luz del sol en alimento. Puesto que la vida animal depende de las plantas para sobrevivir, la clorofila es, en buena lógica, el producto bioquímico más importante, al menos desde el punto de vista de los humanos. Resulta difícil que alguien se tome en serio la explicación del rasgo 4.430 Å en términos de porfirina; pero es que en estos momentos, no disponemos de otra. Como Hoyle y Wickramasinghe han comentado en su libro *Lifecloud*, «la unión de cuatro anillos C_4N para construir una central de moléculas de porfirina es aprovechable energéticamente, y por esta razón podemos esperar que una fracción de material rico en nitrógeno (proveniente de estrellas jóvenes) se condense hasta construir tales moléculas»[45].

La salud del material prebiológico que puede estar presente en las nubes interestelares es impresionante. Pero, ¿cómo dicho material sobrevivió a los efectos del proceso de formación del Sistema Solar y de la Tierra? La respuesta acertada es que no sobrevivió, aunque quizá pudo volver a resurgir dentro del Sistema Solar tras la formación de la Tierra, gracias a visitantes del profundo espacio: los cometas. Los cometas producen ocasionalmente efectos espectaculares en el cielo. El más famoso, el cometa Halley, estuvo de vuelta en febrero de 1986. El Halley nos visita con regularidad cada setenta y seis años; otros, no obstante, sólo nos visitan una vez, nos llegan de lejanas partes del espacio y van camino hacia otras regiones también lejanas, y son éstos, tal vez, los que trajeron las semillas de la vida.

Tanto como una cantidad de material de unos 100.000 millones de cometas puede rodear el Sistema Solar, a una distancia de alrededor de un año-luz, alguna de cuyas piezas a veces se desvía, acaso por la fuerza de gravedad de otras estrellas, hacia el interior del Sistema Solar, circunda el Sol, y es posteriormente devuelta al espacio. Cada uno de estos cometas

---

[45] Fred Hoyle y N. C. Wickramasinghe, *Lifecloud* (Londres, Dent, 1978) página 98.

puede no llegar a tener ni una milmillonésima parte de la masa de la Tierra, por tanto son pequeños según los modelos astronómicos, pero suficientes para ser protagonistas de un espectacular choque con la Tierra. El famoso “acontecimiento de Tunguska”, una gran explosión que tuvo lugar en Siberia en 1908, fue, casi con toda certeza, el choque de un cometa, que por suerte fue a caer en una región deshabitada de nuestro planeta. Un golpe similar en una gran ciudad podría matar a millones de personas, y sus consecuencias serían más o menos las que describen Larry Niven y Jerry Pournelle en un excelente libro de ficción titulado *Lucifer’s Hammer.* El origen inmediato de los cometas todavía se desconoce; algunos aseguran que se trata de material residual del Sistema Solar; otros dicen que es material recogido por el Sistema Solar cuando pasa a través de una nube de polvo y gas. Lo cierto es que contiene una gran cantidad de material más o menos en el mismo estado en que se encuentran las moléculas de las nubes interestelares.

Otra clase de material alcanza la Tierra en forma de meteoritos, fragmentos rocosos, algunos ricos en hierro, que penetran hasta el suelo. Muchas otras partículas, demasiado pequeñas para sobrevivir al golpe que supone el traspasar la atmósfera, se convierten en meteoros, mientras que las partículas más ligeras pueden flotar en el aire y descender con lentitud hasta el suelo. Continuamente recibimos visitas del espacio, y es natural que algunos componentes químicos presentes en él nos alcancen de vez en cuando. Esto incluye otra sorpresa, el descubrimiento, en algunas muestras de meteoritos, de aminoácidos, el constituyente fundamental de la proteína (recuérdese la hemoglobina). El contenido de aminoácidos de un meteorito es sólo de quince sobre un millón, pero no deja de ser una proporción mayor que la que esperaban encontrar los más optimistas seguidores de la versión Haldane-Oparin del origen de la vida.

“ESTANQUES” COMETARIOS

Hoyle y Wickramasinghe se inclinaron hacia el extremo opuesto. Pensaron, en primer lugar, que la casi totalidad de la

atmósfera y de los océanos de la Tierra es producto del choque de cometas, choques ocurridos cuando el Sistema Solar era más joven y el cometa más fuerte; luego sugirieron que las formas de vida pudieron haber evolucionado dentro de una de estas nubes cometarias antes, incluso, de que se desarrollaran en la Tierra los llamados precursores de la vida, debido a las colisiones de dichos cometas contra la Tierra. El "caldo primitivo" —se dijeron— muy bien podría haber tenido lugar en el seno de un cometa.

Otro eslabón en la cadena de descubrimientos de moléculas en el espacio que tengan relación con el origen de la vida en la Tierra se cerró a principios de 1980, cuando W. M. Irvine, S. B. Leschine y F. P. Schloerb publicaron en la revista científica *Nature* los resultados de nuevos cálculos sobre las condiciones que debieron de existir en la nube cometaria que rodea nuestro Sistema Solar. La única gran objeción a la idea Hoyle-Wickramasinghe, según ellos, era que en el espacio los cometas habían de estar congelados, y que las moléculas de la vida se desarrollan más cómodamente en agua líquida, en la que se disuelven los componentes orgánicos que hacen surgir la vida (o, como Darwin diría, en un "pequeño estanque caliente")[46]. Hoyle y Wickramasinghe han discutido esta idea, y han argumentado que los granos de carbono quizá logren, de alguna forma, que las moléculas se adhieran en su superficie para constituir, así, compuestos complejos; pero el grupo de Irvine de la Universidad de Massachusetts ha dado solución a este antiguo problema.

---

[46] Estas palabras de Darwin aparecen en el libro de Clair Edwin Folsome *The Origin of Life* (San Francisco; Freeman, 1979): «A menudo se dice que todas las condiciones para la primera producción de un organismo vivo están ahora presentes, y que pueden haberlo estado siempre. Pero si (y, ¡oh!, qué crucial si) nosotros podemos haber sido concebidos en algún pequeño estanque caliente, con todo género de sales de amoniaco y fosfato, luz, calor, electricidad, etc., hoy, un compuesto proteínico complejo, formado de esta manera, sería al instante devorado o absorbido, lo cual no pudo haber sucedido antes de que las criaturas vivientes fueran creadas.» Como se aprecia, Darwin iba mucho más lejos que Haldane y Oparin, pero nunca se le ocurrió que ese pequeño estanque caliente pudiera formar parte del núcleo de un cometa.

La solución es muy sencilla. A pesar de que las condiciones en una nube cometaria son lo bastante frías como para helar el agua, a menos que alguna fuente de energía consiga calentarla, ahora sabemos con toda seguridad —como vimos al principio— que la formación del Sistema Solar fue debida a la explosión de una supernova. Si los cometas son materia residual del colapso originario del Sistema Solar, es lógico que contengan elementos radiactivos procedentes de la supernova, y en particular, isótopos de aluminio-26. La “vida media” radiactiva del aluminio-26 es de 700.000 años, y conforme se debilitaba tempranamente en la historia del sistema solar, el calor producido podía haber calentado los corazones de los núcleos cometarios, mezclando agua para crear el pequeño “estanque” caliente que la evolución de la primitiva vida requería con toda probabilidad.

Si ello fue en verdad así, ése fue el lugar en el que la célula fue inventada, la “casa” que protege a los replicadores de moléculas de los peligros exteriores, pero que al mismo tiempo les permite recoger “alimentos”. Pero si ni siquiera se acepta esta parte de la teoría de Hoyle y Wickramasinghe, hay que reconocer, al menos, que parece mucho más fácil, mucho más rápido, construir células vivientes en la Tierra partiendo de moléculas prebióticas transportadas por cometas, que partiendo de simple dióxido de carbono, agua y amoniaco. Hay evidencias en las rocas de la corteza de la Tierra que muestran que organismos como bacterias o algas estaban presentes en la Tierra desde hacía, como mínimo, 3.100 millones de años, algo menos que las más antiguas rocas conocidas, y sólo 1.500 millones de años después de que la Tierra se enfriara y solidificara. Pasó mucho tiempo antes de que estos sistemas de vida tan simples adquirieran la complejidad de la vida que hoy se registra. Existen muchas teorías sobre la evolución de la vida, pero por lo que a mí respecta, de ahora en adelante, me mantendré dentro de las corrientes puramente científicas, desde la aparición de la primera simple célula hasta el surgimiento del hombre.



Se cree que los cometas están formados por conglomerados de materia congelada a causa del frío del espacio. Las colas, en ocasiones espectaculares, que "crecen" cuando los cometas se acercan al Sol en su paso por el Sistema Solar interno, son probablemente el resultado de la vaporización y eyección de la materia desde la "cabeza" del cometa. Pero, ¿han sido siempre los cometas puramente hielo? Una reciente sugerencia apunta que en los inicios de la vida del Sistema Solar, los cometas tal vez fueron calentados por la desintegración radiactiva de elementos inestables resultantes de la explosión de supernova que desencadenó la formación del Sistema Solar. En este caso, provistos de agua líquida en su seno, los cometas pudieron haber proporcionado los "pequeños estanques calientes" en cuyo interior comenzó la vida y desde los cuales ésta se extendió a la Tierra gracias a cometas que pasaron cerca desprendiendo materia por el espacio, o mediante el choque directo de un cometa con la joven Tierra. *(Fotografía del Lick Observatory.)*

VI. EL ORIGEN DE LAS ESPECIES

Quizá sea importante recalcar que todas las ideas concernientes a los orígenes de los primeros replicadores son, en buena medida, especulaciones. No sabemos si aparecieron en un “pequeño estanque caliente”, en el centro de un cometa, o bien en los mares de la Tierra primitiva. Efectivamente, a pesar de que toda la vida de la Tierra actual se construye sobre la base del mismo mecanismo de replicadores, incluida la molécula de vida ADN, no sabemos si éste fue el primer replicador o si fue otro el que se desarrolló primero y luego desembocó en la molécula del ADN. Mientras la falta de evidencia directa haga imposible determinar exactamente cómo empezó la vida en la Tierra, deberemos conformamos con conocer sólo cómo la vida —una vez aparecida, por la razón que sea— ha evolucionado sobre el planeta desde que tenemos pruebas de su existencia hasta hoy. Ello cubre más de 3.000 millones de años de la historia de la Tierra (quizá el 20% o menos de la historia de todo el Universo), y el desarrollo de la vida desde los organismos unicelulares hasta la variedad actual, incluyendo a los animales humanos, con sus millones de células vivientes cooperando en la formación de un único organismo vivo, dotado de movilidad, de percepción del mundo que lo aloja y, por último, de una conciencia que le impulsa a uno a preguntarse de dónde venimos. Todo ello resulta del proceso natural de selección entre los replicadores de vida, algunos de los cuales son más eficientes que otros a la hora de reproducir, y unos tienen más capacidad de sobrevivir que otros. Después de 3.000 millones de años, la selección natural nos ha conducido a la amplia diversificación de especies y a la producción de organismos multicelulares: pero los sistemas biológicos “antiguos” no se han visto totalmente sustituidos por otros, puesto que todavía podemos encontrar organismos vivos de una sola célula al lado de los modernos organismos multicelulares.

Esto demuestra la dicotomía de la “lucha por la supervivencia”, nada *quiere* evolucionar, y el proceso básico de la vida es el de la replicación de las moléculas ya existentes. El éxito de tal proceso —y a este nivel— lo constatamos en los “fósiles vivientes” unicelulares que han permanecido inalterados desde el principio de la historia de la vida en la Tierra. Los cambios sólo se producen por error, y muy pocos de ellos son beneficiosos. Algunos productos menos perfectos de estas mutaciones no sobreviven, pero se convierten en “alimentos” para los más avanzados, que sí sobreviven. Muy ocasionalmente, sin embargo, una copia imperfecta goza de mejores resultados que el original en el trabajo de convertir alimentos químicos en réplicas de sí mismo, y una mutación tan extraña como ésta no sólo es posible que sobreviva, sino que pueda extenderse por el entorno. Después de millones de años, la acumulación de copias producto de un error —error, aquí, beneficioso— hace que aparezcan especies tan dispares como un ratón y una seta. Este proceso, no obstante, tiene su justificación y, en el juego de las réplicas, las variedades de célula única que han permanecido sin cambios durante tantos millones de años pueden —desde determinado punto de vista— ser valoradas como éxitos mayores que los de la serie de raras equivocaciones que nos han producido a nosotros.

EL CÓDIGO GENÉTICO

Para comprender cómo el proceso de réplicas puede cometer errores que nos conduzcan a la diversidad de especies, hemos de saber algo de la molécula de la vida, el ADN. El ácido desoxirribonucleico (ADN) es el material de copia básico de toda la vida terrestre. Una bacteria, una seta, la hierba o el hombre mismo, todos han sido elaborados de acuerdo con las especificaciones dictadas por las moléculas de ADN dentro de sus células. La reproducción se verifica por la unión de células especiales y copias de las moléculas de ADN para construir nuevos organismos (cuando menos, eso es lo que ocurre con los

organismos multicelulares; las variedades de célula única, simplemente se rompen en dos, cada una de ellas con una parte de las moléculas de ADN). Las moléculas de ADN, que contienen los "planos" de todo un organismo (como, por ejemplo, el cuerpo humano), reciben el nombre de cromosomas, una parte de estos cromosomas, los que tienen que decidir si el cuerpo debe tener ojos azules o marrones, piel oscura o clara y otra información parecida, son los genes, de los cuales hablaremos más adelante. Es obvio que los cromosomas del ADN de un cuerpo humano son considerablemente diferentes a los de los replicadores unicelulares de los que descendemos, de lo contrario, nosotros también seríamos unicelulares. Pero —ya que supongo que la mayoría de los lectores de este libro serán seres humanos— es más importante para nosotros fijarnos en la complejidad del lenguaje del ADN relacionado de forma específica con los humanos.

Toda molécula de ADN está dispuesta en una estructura de hélice doble, con lazos químicos que eslabonan moléculas en cada espiral, y parejas de moléculas eslabonadas entre sí desde una hélice a la otra, produciendo una estructura muy semejante a la de una escalera de caracol[47]. Cada bloque de construcción

[47] Actualmente, sólo unos pocos biólogos opinan que el ADN no se compone de dos largas moléculas entrelazadas, constituyendo así una larga hélice, sino de dos largas moléculas que forman, cada una, una larga hélice individual, pegada a la otra de la misma manera que las dos partes de una cremallera cenada. De ser conecta esta visión, la combinación debería estar constituida por espirales a la derecha y a la izquierda, mientras que en el caso de la versión de la doble hélice, eso supondría que todas las moléculas de ADN son espirales a la izquierda. Esta visión de una minoría, defendida por el doctor G A. Rodley, de la Universidad de Canterbury, en Nueva Zelanda, parece coincidir con las observaciones que se han hecho partiendo de estudios del ADN por medio de rayos X. al menos tan bien como la versión de la doble hélice. No obstante, las técnicas de difracción de los rayos X no están lo suficientemente perfeccionadas para poder decantarse a favor de una teoría u otra. Cabe señalar, sin embargo, que resultaría más fácil "abrir" la cremallera para poder reproducirse las moléculas de ADN si formaran éstas pares una junto a la otra. Efectivamente, la doble hélice necesita desenrollarse, al igual que necesita "abrirse" (imaginándola como una cremallera) para desempeñar el mismo papel. Y no debe olvidarse que el fenómeno de copia es esencial en el proceso de la vida.

de ADN —las subunidades químicas que se combinan para constituir la escalera de caracol— recibe el nombre de "nucleótido", y sólo hay cuatro "nucleótidos" básicos combinados en cada molécula de ADN. Los nombres de estas bases de construcción se abrevian en A, T, C y G; y dado que las cuatro pueden alinearse en distinto orden, es como si los planes para la construcción y el mantenimiento de todo el organismo se escribieran con un alfabeto de cuatro letras. Éste es, si así prefiere denominársele, el "lenguaje" del ADN. Todo organismo viviente de la Tierra comparte el mismo alfabeto de cuatro letras y el mismo lenguaje del ADN, evidencia palmaria de que todos procedemos de un único antecesor, apareciera éste primero en un cometa o —como asegura la teoría de Haldane— lo hiciera en la Tierra. Un alfabeto de cuatro letras tal vez se antoje restrictivo, pero hoy día los modernos computadores se basan en un lenguaje mucho más simple, el binario aritmético, un lenguaje de sólo dos letras donde las dos únicas variables posibles son "abierto'- o "cerrado", y las únicas respuestas a cualquier pregunta son "sí" o "no". Todos estamos al corriente del éxito de estos aparatos, y es por comparación con su lenguaje binario por lo que advertimos la superioridad del lenguaje de cuatro letras del ADN.

Si el código genético de los cromosomas estuviera escrito en lenguaje binario, el número de "bits" de información en un cromosoma sería, sencillamente, el doble del número de parejas de "nucleótidos" que hay en las moléculas de la "escalera de caracol". Con un alfabeto de cuatro letras, el número de bits de información (respuestas sí/no) llega a ser de cuatro veces el número de parejas de "nucleótidos". Y un cromosoma puede contener 5.000 millones de esas parejas, mientras que cada célula humana contiene cuarenta y seis cromosomas. ¿Cuánta información está almacenada en los 20.000 millones (4 × 5.000 millones) de bits de un cromosoma? Carl Sagan, en su libro *The Dragon of Eden*, establece una analogía como la de las siguientes líneas:

Considérese el lenguaje humano expresado de acuerdo con la moderna versión del alfabeto occidental, con sus veintiséis

caracteres y sus diez números. A fin de especificar cada letra del alfabeto en términos del sí/no del sistema binario hemos de hacemos una serie de preguntas como las que Sagan se hace acerca de la letra J:

1. ¿El carácter es una letra (respuesta 0) o un número (respuesta 1)? Respuesta: 0.
2. ¿Está en la primera mitad (0) o en la segunda mitad (1) del alfabeto? Respuesta: 0.
3. De las trece letras de la primera mitad del alfabeto, ¿está entre las siete primeras (0) o entre las seis últimas (1)? Respuesta: 1.
4. De las letras H. I. J, K. L. M. ¿está entre las tres primeras (0) o entre las tres últimas (1)? Respuesta: 0.
5. De las letras H, I, J, ¿es la H (0) o está entre I y J (1)? Respuesta: 1
6. De entre la 1 y la J. ¿es la I (0) o la J (1)? Respuesta: 1.

Por tanto, en el sistema binario, la J se representa como 001011. Seis "bits" de información especifican una letra del alfabeto, y los 20.000 millones de bits de información recogidos en un cromosoma son el equivalente de más de 3.000 millones de letras del alfabeto. Los impresores dicen que hay un promedio de seis letras en cada palabra[48]; por consiguiente, un cromosoma contiene una información que equivale a 500 millones de palabras; en relación con un libro parecido al que está usted leyendo, con unas 400 palabras por página, un cromosoma es el equivalente a 3.000 libros de 500 páginas cada uno. Esto, según parece, es lo que cuesta describir la construcción, el cuidado y el mantenimiento de un cuerpo humano. Una bacteria de una sola célula necesita menos información y tiene una

[48] Así es en el inglés "ordinario". Pero la revista *New Scientist*, en la cual colaboro a menudo, no encaja en este esquema, y los tipógrafos de la revista tienen que permitir la utilización de palabras de más de seis letras empleadas como media en otras revistas del mismo grupo I P.C., puesto que sus colaboradores tienden a recurrir a palabras más largas y enrevesadas.

cadena de ADN más corta; también resulta más rara la copia de errores en las réplicas de ADN, y la evolución es más lenta.

Una vez aparecieron sobre la Tierra seres vivientes con moléculas ADN más complejas, la copia de errores —la evolución— se convirtió en algo más común, y no es sino eso lo que encontramos en los fósiles.

Un organismo vivo como el de un ser humano se construye a partir de las características del ADN contenidas en la célula primitiva. En el caso de los seres humanos, y de otras formas de vida que se reproducen sexualmente, sucede que la célula inicial se crea por la fusión de otras dos células preexistentes, una de cada progenitor, cada una de las cuales contienen sólo veintitrés cromosomas, razón por la cual los hijos heredan sus rasgos de ambos progenitores. Los cuarenta y seis cromosomas, de hecho, consisten en veintitrés parejas que son, por razones prácticas, intercambiables, pero sólo un gen, en cada pareja, es utilizado (para decidir el color de los ojos, la talla del individuo, etc.); esto es muy importante para la evolución. Una vez que una célula humana fecundada empieza a desarrollarse, los planes originales son una y otra vez copiados siempre que la célula se divida, de modo que cada una de mil millones de millones de células de mi cuerpo, y del de ustedes, guarda una réplica perfecta de los planes originales de todo el cuerpo[49]. Ésta es la base sobre la que se sostiene la idea de seres "clónicos". Pero ya es alejarse demasiado de la historia del origen de las especies.

La célula es la unidad fundamental de la vida tal como la conocemos, tanto para el hombre como para la bacteria. Ignoramos cómo evolucionaron los primeros replicadores, o cómo "inventaron" las células; pero sí sabemos que los organismos vivientes celulares existen en la Tierra desde hace más de 3.000

[49] En rigor, no todas las células contienen idénticas características. Las células que realizan el trabajo de la reproducción —espermatozoides en los hombres y óvulos en las mujeres— presentan, cada una, veintitrés cromosomas construidos mediante la mezcla de los genes de los padres para conseguir nuevas combinaciones. Dentro de poco se desvelará la trama de esta apasionante historia.

millones de años, y podemos explicar, al menos en líneas generales, cómo sus descendientes se han desarrollado y han evolucionado hasta el momento actual. La selección de las células depende de lo bien o mal que hayan sabido aprovechar el medio circundante, y ello, con toda seguridad, es lo que está detrás del concepto darviniano de “selección natural”. La selección natural —un término que Darwin utilizó tanto para hacer una distinción cuanto para hacer una comparación con el modo como se selecciona a los animales, a fin de obtenerlos mejores— opera en la actualidad en el nivel del ADN. Los animales o las plantas con más éxito, en términos de evolución, son los que efectúan un buen trabajo en el momento de transferir réplicas de sus cromosomas de ADN a sus descendientes; éste es el concepto que hay detrás de los modernos conocimientos sobre la evolución, expuestos con claridad por Richard Dawkins en *The Selfish Gene.* El ADN no está “interesado” en el cuerpo o célula que habita, excepto en lo que se refiere a su propia supervivencia. Como dice Dawkins, todos somos “máquinas de supervivencia”, productos del ADN, manipulado por nuestros genes con el fin de asegurar su supervivencia y desarrollo. El hecho de que la vida sobre la Tierra, hoy, esté dominada por células y organismos multicelulares, da una idea de la forma de la máquina de supervivencia de las células en su función de elaborar réplicas del ADN.

CÉLULAS AFORTUNADAS

Después de la aparición del primer replicador, el mejor “invento” de la vida ha sido, sin duda alguna, la célula, un hogar seguro que protege al replicador de moléculas de los peligros circundantes. La vida en la Tierra puede dividirse en dos clases, sobre la base de dos tipos diferentes de células. La diferencia entre ambas es la más profunda de todas, más importante, incluso, que la existente entre los animales y las plantas. Ambos, animales y plantas, están constituidos con la misma clase de células, denominadas “eucariotas”. La etimología de este nombre es griega y significa “núcleo verdadero”, refiriéndose a la

característica más destacada de estas células, que es la presencia de otra célula en su interior, la cual contiene los cromosomas de ADN. Ésta es la clase de célula con la que se nos ha fabricado.

La mayoría de las células son diminutas —quizás una décima o una centésima parte de un milímetro de diámetro—, si bien los óvulos pueden ser grandes: la yema de un huevo de gallina, por ejemplo, es una célula simple. A pesar de que las células de un organismo complejo, supongamos el cuerpo humano, pueden tener formas distintas y pueden realizar funciones diferentes, todas comparten unas mismas características básicas. La primera y más importante es la membrana que envuelve la célula, que la preserva del mundo exterior Aunque tenga solamente unas diezmillonésimas de milímetro de espesor, esta membrana es capaz de controlar por completo el medio ambiente del interior, dejando entrar algunas moléculas (“alimentos”) y salir otras (desechos). La membrana es la que selecciona las moléculas que pueden entrar, a las que reconoce por su tamaño y forma: en el interior, flotando en un líquido denominado citoplasma, una variedad de estructuras especializadas controlan los procesos químicos por los que los alimentos se transforman en energía, se transmiten los mensajes desde el exterior, etc. El núcleo es el controlador central de toda la actividad y, por analogía, puede ser descrito como el cerebro de la célula. Su función prioritaria es la de almacén de información, es la “biblioteca” que posee los detalles no sólo de las actividades de cada célula, sino del cuerpo entero en que habitan. De entre tales estructuras, la mitocondria es la que tiene por función transformar los alimentos en energía, mientras que los ribosomas son los encargados de la construcción de nuevas moléculas proteínicas mediante el uso de las materias primas químicas disponibles. Las células vegetales, a diferencia de las animales, tienen unas estructuras portadoras de la clorofila que son de vital importancia para el proceso conocido como fotosíntesis, por el cual las plantas convierten la luz solar en energía. En cambio —y porque carece de esta estructura—, no hay ningún animal capaz de convertir la luz solar en energía, de

manera que todos los animales dependen de las plantas (o de otros animales que previamente han comido plantas) para conseguir su alimento. En otras palabras, las células de animales y plantas se asemejan bastante.

Las células "procariotas" constituyen formadas dos familias dentro de la variedad de la vida sobre nuestro planeta: la de las bacterias y otra forma de vida unicelular a veces llamada alga azul-verde", pero con más precisión concretamente (debido a su parecí do con las bacterias) descrita como cianobacteria, que es el nombre que yo utilizaré. Las cianobacterias producen oxígeno, y esto ha resultado trascendental en la Listona de nuestro planeta durante cientos de millones de años. Pero tanto las cianobacterias como las bacterias son especies unicelulares que se reproducen mediante su división; no tienen núcleos organizados y sólo una pequeña proporción de ADN que flota en su citoplasma dentro de la membrana celular. Es obvio el motivo por el cual los biólogos las clasifican como "pre" eucariotas. En efecto, es muy probable que ambas familias sean derivaciones de lo que con anterioridad fueron formas de vida del todo independientes. Lynn Margulis, de la Universidad de Boston, es quizá la más importante defensora de dicha teoría, que asegura que las modernas células eucariotas se desarrollaron a partir de una combinación de predecesoras procariotas que aprendieron a vivir juntas prestándose mutua ayuda. Ambas tienen fragmentos de ADN que recuerdan el ADN procariótico, y esta posibilidad de que unas células evolucionen hasta convertirse en otras no es más descabellada que la de que muchos millones de células "se junten" (o mejor, "crezcan juntas") para formar un animal o una planta. Es como si los primitivos modos de vida hubieran aprendido a cooperar creando células, mientras que las células han aprendido a cooperar para crear organismos más complejos, y, efectivamente, en algunos ejemplos (como el de las abejas) vemos cómo seres individuales han "aprendido" a cooperar, y todo para afianzar su supervivencia. La vida puede ser, como vemos, muy complicada, dada la multiplicidad de caminos abiertos a la vida en la Tierra.

Si los biólogos están en lo cierto, hemos de suponer que sólo hallaremos evidencias de vida eucariótica sobre la Tierra desde el momento en que la vida procariótica estuvo establecida con firmeza. Y así es; no obstante, para comprenderlo bien, es necesario divertimos un poco con la geología y la paleontología (que es la disciplina que estudia los fósiles).

HISTORIA DE LOS FÓSILES

Digo divertirnos un poco no porque sea sencillo lo que vamos a ver, sino porque sólo nos ocuparemos de algunos extremos, sin adentrarnos mucho en ellos. La complejidad viene, sobre todo, cuando tratamos de interpretar los registros del pasado de la Tierra encontrados en las rocas, y también al intentar fijar una cronología. Una vez establecido esto, los registros encontrados nos hablan de cómo ha evolucionado la vida, de donde deducimos que las procariotas fueron los primeros seres en existir, al menos en lo que hace referencia a la vida celular.

Para comprender cómo se han desarrollado la historia de la Tierra y la de la vida en la Tierra, hemos de conocer cómo son las antiguas muestras geológicas. El primer paso hacia la elaboración de un “calendario” geológico lo dieron los geólogos al determinar cuáles son las rocas más antiguas y cuáles las más modernas. En el transcurso de los siglos XVIII y XIX, los geólogos, localizados principalmente en el Reino Unido y Europa occidental, pergeñaron sus esquemas de divisiones del tiempo geológico y dieron a las rocas nombres (por lo común latinizados o en griego) que aludían a las regiones europeas en las cuales fueron encontradas; así, por ejemplo, un período de tiempo fue bautizado con el nombre de Cámbrico, que proviene del nombre latino que significa País de Gales, donde se hallaron muchas rocas de ese período. En general, puede considerarse que las rocas más antiguas permanecen bajo nuestros pies, en las partes más profundas cubiertas por sucesivos estratos de rocas cada vez más modernas. Pero —puesto que el material de la corteza se ha plegado, roto y deteriorado a causa de fuerzas relativas a la actividad tectónica, con montañas enteras que han

sido desplazadas de su lugar en algún momento de su historia— esto no siempre es cierto. En cambio, lo que sí podemos tener en cuenta como una buena guía para establecer la antigüedad de cada capa son los fósiles que hay en los diversos estratos y que en su momento fueron seres vivos.

Las fronteras son relativamente fáciles de determinar. La mayor división entre eras corresponde a los cambios fundamentales que apreciamos cuando numerosas especies, registradas en los fósiles, desaparecen durante un corto período de tiempo (una delgada capa de roca) y son reemplazadas por otras; a esto se llama "extinciones de fauna". Las divisiones más pequeñas, períodos y épocas, dependen de sutiles cambios que se registran en los fósiles de una misma especie, lo cual explica que diversas autoridades en la materia daten de manera disímil las fronteras entre, por ejemplo, el período Triásico y el Jurásico. En este contexto, las fechas no son sino estimativas, con un margen de error de varios millones de años, en un sentido o en otro: margen —aceptado— no significativo en exceso para la datación de un período de, digamos, hace 190 millones de años. Si los fósiles son restos de criaturas vivientes —como así es—, y si son importantes para la determinación del calendario geológico, hay entonces un peligro evidente de incurrir en argumentos que pueden girar en un círculo vicioso si los restos geológicos se utilizan para interpretar la evolución de la vida en la Tierra. El fósil *A*, por ejemplo, encontrado en el estrato *A*, es considerado biológicamente más avanzado que el fósil *B* del estrato *B*, de forma que las rocas *A* son consideradas más jóvenes que las *B*. Entonces, tal vez, en una generación posterior, aparezca un biólogo que estudie los orígenes de la vida y afirme que, toda vez que las rocas *A* son más jóvenes que las *B*, la vida ha de haber evolucionado, en una circular argumentación sin fin. Por fortuna, este problema ha sido prácticamente eliminado por los progresos en materia de técnicas de datación realizados en nuestro siglo XX, y me estoy refiriendo, en particular, a las técnicas que dependen de las mediciones de la radiactividad. Así es que, a pesar de que los calendarios geológicos actuales todavía mantienen los nombres de

las divisiones del tiempo geológico heredados de las investigaciones de siglos pasados, las fechas de dichos calendarios están determinadas por medio de técnicas radiactivas. Al contrario de nuestros predecesores, que solamente podían elaborar un esquema de tiempo relativo (períodos más antiguos o más modernos), nosotros disponemos de la información extra que nos han suministrado las mediciones de tiempo "real" (fechas especificadas en años, aunque con un margen de error de pocos millones de años).

A través de la curva del tiempo geológico, los isótopos radiactivos son los más apropiados para ser usados como "relojes", por medio de una técnica muy semejante a la del calendario de radio-carbono, tan útil para datar muestras orgánicas de entre 50.000 y 100.000 años de edad. Los isótopos de uranio —más de una docena en total— son todos radiactivos y pueden desintegrarse en otros productos. El uranio-238, por ejemplo, se transforma en plomo-206, con una vida media de 4.500 millones de años, y el uranio-235 puede transformarse en plomo-207, con una vida media de 710 millones de años. El hecho de que casi todo el plomo que existe hoy día en la Tierra es el resultado de este tipo de desintegración radiactiva constituye una indicación sobre el tiempo acaecido desde que se formara el Sistema Solar, y sobre la intervención de elementos pesados y radiactivos en las explosiones anteriores de supernovas que procesaron la materia interestelar primitiva.

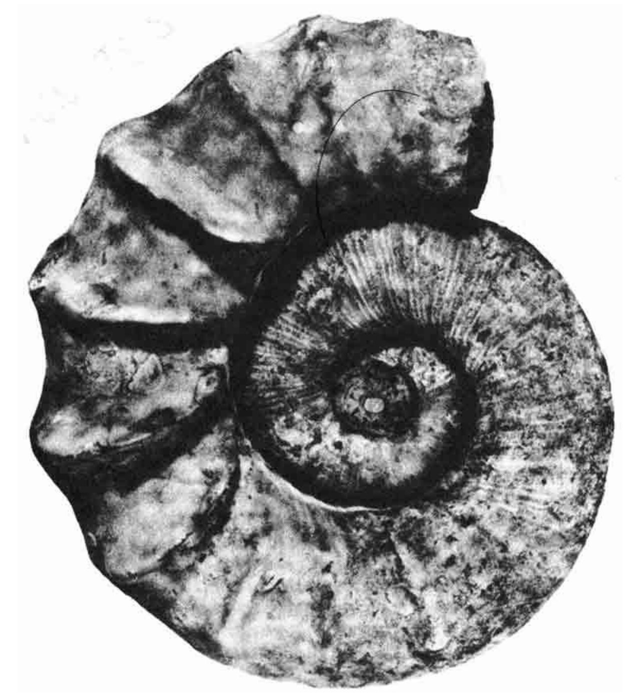
La segunda familia de relojes geológicos radiactivos nos la ofrece la desintegración del potasio-40, que se transforma en argón- 40, con una vida media de 1.300 millones de años. Todas las técnicas de medición de las edades geológicas resultan muy difíciles en la práctica, y la técnica del potasio-argón no es más sencilla de realizar porque el argón sea un gas, ya que éste tenderá a escaparse, a menos que se le obstruya el paso de algún modo. Pero estas dificultades son superables, y lo que de verdad interesa aquí es que las mediciones exactas de las proporciones de los isótopos de plomo y uranio y de los de potasio y argón encontradas en las muestras de roca, puedan orientamos correctamente para determinar las edades de dichas rocas,

así como otras mediciones similares de muestras de meteoritos nos orientan para averiguar la edad del Sistema Solar e incluso de todo el Universo.

Provistos de tal información, los registros geológicos nos dicen mucho sobre la evolución de la vida en la Tierra. Pero los restos de fósiles conservados en los distintos estratos de rocas no son, en modo alguno, los únicos seres vivos en aquel entonces, y es oportuno recordar que los restos de fósiles son siempre incompletos. Debieron de existir muchas especies —a buen seguro la mayoría— que vivieron, se reprodujeron, evolucionaron y murieron durante toda la historia de la Tierra sin dejar restos para que los modernos paleontólogos puedan estudiarlos. Uno de los motivos que nos induce a pensarlo es que, salvo contadas excepciones, sólo se han conservado fósiles de las partes duras, por lo que las plantas y los animales blandos apenas han dejado vestigios.

De los animales con esqueleto —animales vertebrados— son los huesos lo que suele conservarse con más facilidad, además de la dentadura. De los seres con concha, fueron éstas las que se fosilizaron. No obstante, en ambos casos, los restos quizá se rompieron o trocearon antes de fosilizarse, lo cual dificulta la labor de reconstrucción del paleontólogo. Hay diferentes procesos de fosilización, pero en todos ellos (simplificando mucho) la parte ósea o las conchas se ven alteradas por reacciones químicas que reemplazan sus constituyentes originales por minerales procedentes del agua que gotea y cala los restos. El material original, en apariencia, ha desaparecido por completo, lavado por el agua, pero su lugar puede ocuparlo una réplica esculpida en la roca, a veces con detalles muy precisos del animal original. Asimismo, una concha incrustada en una roca puede también haber desaparecido, no sin dejar en su lugar un “molde”, un perfecto exponente del original. Ocasionalmente, un animal débil, como una medusa o un gusano, pudo morir y ser cubierto por barro, en el cual se plasmó la forma de dicho animal; también otra clase de huellas (pisadas, galerías de lombrices) se preservan de la misma manera. Y aquí es

donde aprovechamos para volver a la historia de la expansión de la vida sobre la Tierra.



Un ammonites fósil, típico de la afortunada variación sobre la materia de la vida, que proliferó en todos los océanos del mundo hace entre 300 y 200 millones de años. *Copyright del British Museum (Natural History).*

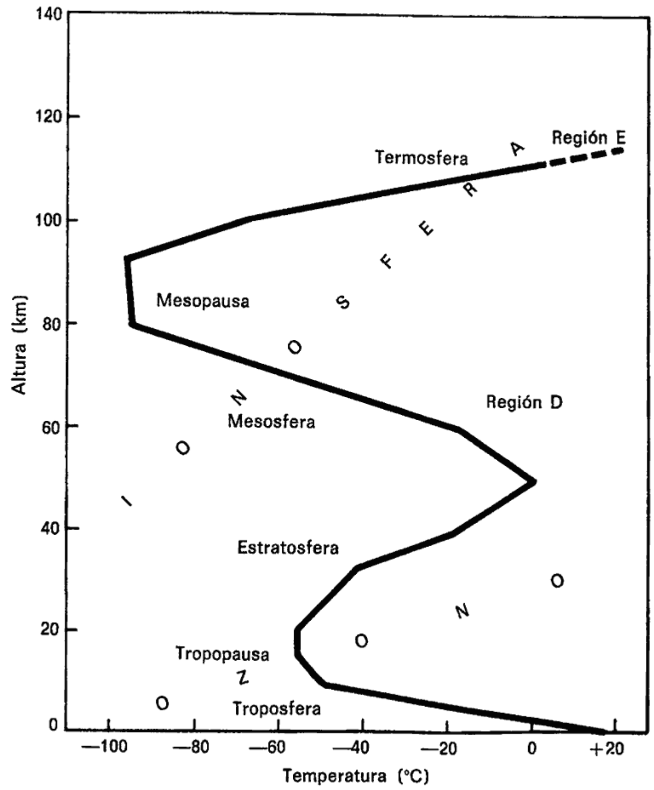
De las más remotas evidencias de vida sobre la Tierra disponemos gracias a las huellas antes mencionadas (en relación con bacterias y cianobacterias), en rocas de más de 3.000 millones de años de antigüedad. Sin embargo, apenas hay evidencias de la existencia de modos de vida más complejos en rocas anteriores a los 600 millones de años. La primera y capital frontera en el calendario geológico marca el comienzo del período llamado Cámbrico. En términos geológicos, *todo* lo que ocu-

rrió hasta entonces —los primeros 4.000 millones de años (alrededor del 90%) de la historia de la Tierra como planeta— recibe el nombre de Precámbrico, de que muy poco se sabe, al menos en comparación con nuestros pormenorizados conocimientos sobre los últimos 500 o 600 millones de años. La misma distorsión, cual si miráramos por un telescopio al revés, aparece en las periodizaciones más modernas de los tiempos geológicos, debido a que conocemos mucho mejor los estratos más modernos, en tanto que los más antiguos se han deteriorado como efecto de la erosión, transformándose en otros materiales de más difícil identificación y estudio. De esta forma, para los últimos 65 millones de años, a partir del comienzo del Terciario, necesitamos una escala de tiempo más precisa que el sistema de períodos, y, en consecuencia, dividimos el Terciario en épocas. El Terciario ocupa el 10% del tiempo desde el comienzo del Cámbrico; y si observamos el período más próximo a nosotros, encontramos el Cuaternario, que comenzó hace sólo 2 millones de años. Sabemos mucho más sobre el 10% más reciente del tiempo acaecido desde el inicio del Terciario (o sea, los 5 o 6 últimos millones de años) que sobre el resto de ese período, y mucho más todavía sobre los últimos 500.000 años, ¡y para qué hablar, por supuesto, de lo que ocurrió la semana pasada!

LOS PRIMEROS DIAS

Fue durante el largo Precámbrico cuando la vida surgió sobre la Tierra, y la evolución hizo que la vida se ramificara pronto hasta alcanzar a la gran variedad de especies actual. El motivo por el cual trazamos una frontera entre el Precámbrico y el Cámbrico no es otro que la propagación de formas de vida distintas, a juzgar por los hallazgos de fósiles de estos períodos. En otras palabras, las rocas cámbricas no se distinguen de las de los períodos inmediatamente precedentes. Y la razón de la existencia de tanta diversidad de fósiles a partir del Cámbrico es que los seres vivos de la época se desarrollaron con comodidad, se fosilizaron y ahora pueden identificarse. No obstante,

hubo una enorme cantidad de seres antes del Cámbrico, pero eran animales pequeños que dejaron muy pocas huellas, vida microscópica (formas unicelulares), que se han conservado en restos fósiles microscópicos. Pero el efecto del paso por la Tierra de esas formas sencillas (Je vida fue tan importante como cualquier otra forma ulterior de actividad vital, puesto que, gracias a ellas, la atmósfera, que se componía de una mezcla de los productos desprendidos de los vapores volcánicos —entre ellos, una gran cantidad de anhídrido carbónico— se transformó en la combinación de gases, rica en oxígeno, que hoy conocemos, ofreciendo así una protección que fue vital para propiciar la extensión de la vida por la tierra, y suministrando, asimismo, el oxígeno necesario para desarrollar la actividad acelerada de la vida animal. Fue durante el Precámbrico cuando se reunieron las condiciones para que se produjera la explosión de la diversidad de especies. De momento no me preocuparé demasiado en explicar *cómo* evolucionó cualquier criatura viviente, incluso esas primitivas células de la cuales descendemos. Si aceptamos que la evolución, sin más, ocurrió, y que los replicadores más afortunados son, por definición, los que tienen más descendencia, de modo que cualquier célula que accidentalmente se desarrollara con unas características adecuadas pronto se extendería, debemos entender cómo evolucionaron las primeras células durante el Precámbrico.



La naturaleza de la atmósfera actual de la Tierra es un legado de la actividad de los primeros organismos unicelulares que aprendieron a vivir con oxígeno, durante el Precámbrico. Debido a que nuestra atmósfera es rica en oxígeno, las reacciones fotoquímicas han conducido a la creación de una capa rica en ozono, la forma triatómica del oxígeno. Se trata de la estratosfera, la cual actúa como "tapadera" de los sistemas del tiempo atmosférico de la troposfera que se encuentra debajo y como escudo protector contra la perjudicial radiación ultravioleta del Sol. La estructura estratificada de la atmósfera se aprecia mejor mediante los cambios de temperatura con la altitud (la región en la que la temperatura aumenta con la altitud indica que la energía está siendo absorbida en la estratosfera); esta energía consiste casi por entero en radiación ultravioleta que, en caso contrario, dejaría estéril la superficie terrestre.

Con todos los cabos de la geología atados, los geofísicos, astrónomos, paleontólogos y biólogos, vinculados al trabajo de lograr un esquema de proceso evolutivo de la vida en este planeta, se repetirán en sus investigaciones sin poderlo evitar. Sin embargo, cada vez que nos enfrentemos con algo conocido, conviene que lo hagamos desde el punto de vista de la disciplina científica de que se trate, que, con el concurso de las demás, nos llevará a obtener un esquema global. En primer lugar, quizá debamos delimitar el período de tiempo que se pretende estudiar. Los más escrupulosos de los investigadores actuales establecen que el final del Precámbrico tuvo lugar hace 570 millones de años, si bien en números redondos se acepta la cifra de 600 millones de años. Y los fósiles de medusas, gusanos y animales parecidos se han registrado en rocas datadas 100 millones de años antes del final del Precámbrico. En tiempos más remotos aún (hace más de 700 millones de años) puede situarse la época en que dominaron la Tierra las formas de vida unicelulares. En rocas todavía más antiguas pueden hallarse fósiles muy peculiares constituidos por capas a modo de una pila de hojas de papel. No ha sido hasta estos últimos treinta años cuando los paleontólogos han confirmado sus sospechas de que esta clase de restos son fósiles de grandes colonias de bacterias, identificadas en Sharks Bay, en la parte oeste de Australia. No obstante, excepto en algunos lugares especialmente hostiles a otro tipo de vida (las aguas de Sharks Bay, por ejemplo, son demasiado saladas para la mayoría de animales), son raros de encontrar debido a que servían de alimento a otros seres vivientes; pero su presencia pone de relieve que la evolución de la vida no es sino el relevo de unas especies por otras. Una vez se ha desarrollado un buen sistema de réplica y es apropiado para un medio ambiente determinado, puede persistir durante largos períodos de tiempo (largos comparados incluso con las medias geológicas); la expansión de la vida sobre el planeta resulta ser así, más que nada, una historia de su diversificación según las circunstancias ecológicas. Un ser humano es más complejo que una bacteria, pero la bacteria es, por lo menos, tan afortunada

como una “máquina de vida” en el momento de reproducir sus propios genes.

De este modo, volvemos a la historia de las células procariotas y eucariotas. Los microfósiles indican, a todas luces, que las procariotas existieron antes, y que las células más típicas del grupo de las eucariotas entraron en escena mucho más tarde. Las diversas habilidades de las dos clases de células revelan que esto debió de ser así, puesto que casi todas las eucariotas necesitan oxígeno para vivir (incluso las pocas y extrañas eucariotas actuales que no necesitan oxígeno parece seguro que proceden de antecesoras que sí lo necesitaban), mientras que en el grupo de las procariotas hay una enorme variedad en cuanto a grados de necesidad de oxígeno. Algunas bacterias no pueden crecer ni reproducirse si carecen de oxígeno, otras lo toleran, pero pueden vivir si no lo tienen, y hay una clase de procariotas que no lo necesitan pero que, no obstante, se reproducen mejor si lo tienen, aja vez que para otras es imprescindible en absoluto su presencia. Este es el esquema que tendríamos si las procariotas se hubieran dividido en diversas familias, formando diferentes especies unicelulares, mientras que el oxígeno se iba introduciendo lentamente en la atmósfera. Y la ausencia de tal diversidad en las necesidades de oxígeno de las eucariotas implica que las mismas sólo se extendieron de verdad cuando la concentración de oxígeno en la atmósfera fue similar a la actual. Estas evidencias confirman que las procariotas eran, en efecto, “pre” eucariotas, y que representan la más antigua forma de vida conocida hasta el presente.

OXÍGENO Y VIDA

La relación evolutiva entre procariotas y eucariotas se nos muestra singularmente en la forma en que obtienen energía. En el caso de las eucariotas —incluyéndonos a nosotros mismos—, el proceso básico por el cual los alimentos se transforman en energía o representa la respiración, en la que la glucosa derivada del alimento (o de la fotosíntesis, en el caso de las plantas) es “quemada” con oxígeno para producir dióxido de carbono y

agua, y así liberar energía[50]. Algunas procariotas, las que pueden vivir con oxígeno y utilizarlo, son capaces incluso de realizar el proceso de la respiración, aunque la mayoría dependen únicamente del proceso conocido como fermentación. En la fermentación, la glucosa se desintegra sin que se produzca reacción alguna que implique a ningún material exterior a la célula. Esto libera un poco de energía, pero nunca tanta como la respiración.

En ambos procesos, la energía producida es "capturada" para emplearla en la construcción de moléculas de adenosintrifosfato, que tiene un enlace químico hiperenergético en los enlaces de fosfato. (Se pueden utilizar otros fosfatos, aunque el ATP es, con mucho, el más común.) La energía sobrante se transforma en calor, mientras que cuando la célula necesita energía, la obtiene desintegrando el ATP. En el metabolismo respiratorio se dan dos grandes fases para la producción de ATP. La primera, llamada glucólisis, rompe una de las moléculas de glucosa de seis átomos de carbono en dos, cada una con tres átomos de carbono. Estas no necesitan oxígeno y producen dos moléculas de ATP, cada una con su propio depósito de energía. El siguiente paso, llamado ciclo del ácido cítrico, toma una de estas nuevas moléculas y, en combinación con el oxígeno, forma treinta y cuatro moléculas más de ATP. La fermentación es muy parecida a la primera fase de respiración —glucólisis—, pero sin la participación del oxígeno; esto quiere decir que por cada molécula disponible de glucosa, la respiración produce en total dieciocho veces más energía (36 moléculas de ATP en vez de dos) que la fermentación. La respiración libera casi toda la energía química de los enlaces de la compleja molécula de glucosa, dejando aparte solamente las moléculas simples de agua y dióxido de carbono. A pesar de que la similitud entre fermentación y glucólisis hace deducir que la respiración ha evolucionado desde las procariotas, la inmensa cantidad de energía extra suministrada por la respiración explica

[50] Esto es más lento que quemar carbón o gasolina en un motor, pero sigue los mismos principios químicos básicos.

por qué los organismos que pueden utilizarla se han desarrollado creando muy diversas especies (no sin incluirla los animales, que queman energía de manera incesante con su actividad y rápidos movimientos), en tanto que los fermentadores lo han hecho con un estilo de vida más sedentario.

En las células musculares de los mamíferos, por ejemplo, la pérdida de oxígeno puede tener lugar cuando la actividad prolongada provoca una demanda de oxígeno superior a la que la sangre es capaz de suministrar. Cuando esto ocurre, el ciclo de ácido cítrico no puede funcionar con eficacia en el método de glucólisis. Las moléculas “extra” se transportan al hígado, donde la energía es reconvertida en glucosa. O quizás estas moléculas son primero convertidas en ácido láctico, transportadas a continuación al hígado y finalmente convertidas en glucosa. Este curioso procedimiento, que entra en acción cuando las células y el animal entero se encuentran sometidos a un gran estrés, parece ser el responsable de que la bacteria disponga de productos en forma de ácido láctico, y las células musculares que necesitan más oxígeno logran, en la medida de sus posibilidades, reiniciar el proceso por el cual se suministraba energía a nuestra antecesora unicelular en la época precámbrica, antes de que hubiera oxígeno a disposición. En términos de diversificación y origen de las especies, y también en términos de supervivencia genética, los genes capaces de hacer esto han sobrevivido durante 3.000 millones de años; la razón de ello es que jugaron la baza de una célula que puede, en un momento preciso, obtener alguna energía si se ve privada del oxígeno. En cuanto a los humanos, los que entre nuestros antecesores disfrutaban de dicha célula sobrevivieron y los que no, desaparecieron. Esto ayuda a comprender el motivo por el cual un corredor de maratón puede correr durante tanto tiempo y por qué está tan hambriento después de una carrera.

A pesar de que algunas células pueden sobrevivir algún tiempo sin oxígeno, incluso tratándose de organismos que lo necesitan (organismos aerobios, en contraposición a los anaerobios), ningún proceso celular puede tener lugar, en el caso de las eucariotas, si no hay oxígeno. Las células eucariotas son

incapaces de dividirse si no hay un poco de oxígeno, lo que significa que los organismos eucarióticos unicelulares no se pueden reproducir sin oxígeno: esto pone de manifiesto que sólo pudieron aparecer y evolucionar una vez formada nuestra atmósfera. ¿Cómo, pues, y cuándo, la atmósfera se transformó en lo que es hoy?

Si volvemos la vista atrás para responder, en primer lugar, la pregunta "cuándo", podemos obtener un buen indicio de la época en que apareció el oxígeno en la atmósfera terrestre mediante la observación de los registros fósiles precámbricos eucarióticos[51]. En rocas siberianas de una edad de 725 millones de años han sido hallados algunos filamentos fósiles similares a las modernas algas verdes; los microfósiles eucarióticos del Gran Cañón se han datado en unos 800 millones de años, una edad semejante a la de algunos microfósiles de algas encontrados en Australia. De modo que podemos asegurar que la vida eucariótica de respiración por oxígeno se estableció firmemente hace 800 millones de años. Más atrás en el tiempo, se han descubierto restos muy parecidos a las células eucarióticas en rocas de unos 1.500 millones de años, y ello incluye microfósiles tan bien conservados que es posible distinguir la organela dentro de la célula. Pero a pesar de haberse descubierto microfósiles con una antigüedad superior a los 1.500 millones de años, ninguno de ellos parece poder identificarse definitivamente como eucariótico. Hace 1.500 millones de años, debió de producirse una clara ruptura, registrada en los microfósiles encontrados, tan significativa como la distinción que pueda haber entre períodos geológicos determinados por los registros macrofósiles. Si no estuviéramos ahora tan sujetos al calendario geológico tradicional, buscaríamos un nombre para este período anterior a los 1.500 millones de años —¿el Precámbrico, tal vez?— y tal frontera indicaría la importancia de la ruptura en cuanto a la evolución de la vida y de la Tierra toda. Durante

---

51 En este caso sigo el sumario proporcionado por J. William Schopf en su artículo "The Evolution of the Earliest Cells", que apareció en el número de septiembre de 1978 de la revista *Scientific American*.

un período entre 3.000 y 1.500 millones de años, las procariotas gobernaron el planeta. Luego llegaron las eucariotas, para ser seguidas de todas las demás especies capaces de prosperar en un planeta con una atmósfera rica en oxígeno. Y los procesos biológicos que produjeron el oxígeno, y que continúan en la actualidad, debieron iniciar su funcionamiento durante dicho período (hace 1.500 y 3.000 millones de años). Las llamadas formas de vida primitivas (lo bastante "primitivas" como para haber sobrevivido eficientemente durante 3.000 millones de años) todavía existen en la Tierra, y realizan el mismo trabajo que sus —y nuestras— antecesoras debieron de realizar cuando no había oxígeno, obteniendo energía de la luz del Sol por medio de la fotosíntesis. Si bien la mayor parte de las fotosíntesis que se producen en las plantas verdes actuales (y en las cianobacterias) liberan oxígeno a la atmósfera como un producto totalmente acabado, algunas clases de bacterias ni necesitan oxígeno para su metabolismo ni generan oxígeno por fotosíntesis, ni, por supuesto, cumplen su tarea si hay oxígeno presente. Como las bacterias de Sharks Bay, parecen sobrevivientes de una época periclitada, de un tiempo en que el oxígeno era puro veneno para cualquier ser que viviera sobre la Tierra (o mejor, en los mares de la Tierra, puesto que esto sucedía mucho antes de que la vida colonizara la tierra firme).

FOTOSÍNTESIS

En la primera fase de la fotosíntesis, la energía de la luz es absorbida por moléculas sensibles a una determinada longitud de onda, exactamente al revés de lo que ocurre en el proceso por el que dichas moléculas podrían emitir energía a distintas longitudes de onda, produciendo nítidas líneas en el espectro electromagnético, en el supuesto de que dispusieran de un exceso de energía. La energía solar se utiliza para conducir una serie de reacciones químicas beneficiosas para el organismo que está realizando la fotosíntesis. Éste es un proceso complejo en el que intervienen electrones que han sido dotados de energía por la radiación (la de la luz del sol) y convertidos en una

serie de moléculas denominadas portadoras de electrones, resultando una pequeña corriente eléctrica que sirve para transformar las moléculas de agua en hidrógeno (necesario para el organismo) y oxígeno, y para transformar las moléculas de ADP en moléculas de ATP. El hidrógeno, el carbono, el dióxido y el ATP pasan entonces a la siguiente fase de reacciones para fabricar glucosa, en tanto que el oxígeno, en las plantas modernas, es expulsado a la atmósfera. Sólo en la primera fase del proceso es necesaria la luz del sol; una vez que el ATP está presente, el organismo puede continuar el proceso en la oscuridad, por la noche. La glucosa está entonces disponible para la compleja variedad de reacciones químicas relacionadas con el metabolismo, tanto en el organismo que realiza la fotosíntesis como en cualquier otro organismo que se haya comido al anterior. Sin la fotosíntesis, no seríamos nada, excepto plantas verdes; tampoco habría animales, ya que estos animales no pueden convertir la luz solar en energía en forma de componentes metabolizables, de modo que dependemos por completo de las plantas en lo que a alimentación se refiere: o bien comemos plantas, o bien comemos animales que previamente han ingerido alguna planta para vivir y crecer.

Pero, ¿por qué plantas *verdes*? El color depende exactamente de la proporción de longitud de onda de luz solar que haya sido absorbida, y el verde representa la radiación "residual" que no se absorbe, pero que se refleja como luz visible. Las plantas verdes utilizan moléculas de clorofila para realizar la absorción de energía, usando luz en las partes roja y azul-violeta del espectro, y liberan mucha de la luz solar amarilla y verde, que es la que refleja. Esto es muy curioso, porque nuestro Sol irradia una mayor cantidad de energía en la parte amarilla/verde del espectro que en la roja y azul- violeta, y hay otros compuestos que pueden ser más eficaces para la fotosíntesis que la clorofila. Así, otras plantas se han adaptado para usar otros pigmentos, reflejando la luz roja y absorbiendo la energía de la luz amarilla/verde, con lo que resultan plantas de color rojo. Sabemos que tales plantas han evolucionado desde fotosintetizadores que utilizaban clorofila porque, en realidad,

todavía la usan —la energía absorbida por los “nuevos” pigmentos se transforma *primero* en clorofila (un paso del todo innecesario) y, a partir de entonces, ya recorre el camino de que se trate.

Dos cosas importantes —una definitiva, otra especulativa— pueden aprenderse de todo ello. Primera: tal modelo, en el cual se realizan posteriores adaptaciones evolutivas para modificar así los sistemas existentes, es característico de cómo la evolución tiene lugar. Más ampliamente, los animales cuyos antecesores son marinos han tenido que adaptar las aletas en patas y brazos; los animales de tierra no han “perdido” sus aletas y luego han “inventado” los brazos y las patas. Este modelo de cambio se ve particularmente claro cuando se estudian los fetos, en los que se advierte que cada ser humano se desarrolla a través de distintas fases, en las cuales parece un pez, luego un reptil y un mamífero no primate, antes de adoptar una apariencia humana. Esta “recapitulación” es consecuencia del hecho de que somos descendientes de todas esas formas de vida, todas surgidas a partir de un óvulo. Los cambios se han producido a causa del desarrollo de un diseño mejorado (o un nuevo y desastroso diseño, pero eso no tiene importancia ahora). En cada estadio se da el suficiente margen para cambios en el código del ADN como para originar un modelo algo diferente a los habidos en el pasado, diferentes como puedan serlo las versiones de 1981 y 1982 de un mismo modelo de coche. La compleja membrana de interacciones que mantiene vivo un organismo viviente quedaría destruida si se produjeran cambios a gran escala.

Segunda (más especulativa interpretación del singular modo en que las plantas de la Tierra se adaptan a la luz de nuestro Sol): consiste en el argumento de que la fotosíntesis quizá no haya sido inventada en la Tierra. Si Hoyle y Wickramasinghe están en lo cierto, entonces es posible que incluso las células fotosintetizadoras se hayan desarrollado en el espacio antes de que la vida llegara a la Tierra, y tal vez la clorofila sea un pigmento mucho más apropiado para la eficiente absorción de la luz en esas condiciones. Hoyle y Wickramasinghe no van

tan lejos en su libro *Lifecloud,* pero apuntan el hecho de que los anillos químicos que constituyen la parte básica de la molécula de la clorofila (cada anillo contiene un átomo de nitrógeno y cuatro de carbono, C_4N) están presentes en la familia de las porfirinas y explican la absorción de la luz en el espacio interestelar a 4.430 Å. Ésta todavía resulta una interpretación polémica de la evidencia; pero ellos dicen que "los constituyentes básicos de la clorofila pueden muy bien haber sido añadidos a la Tierra", lo que sugeriría, sin duda, una buena razón de por qué la vida sobre la Tierra debió de empezar fotosintetizando con la ayuda de la clorofila y con la de cualquier otro componente. Una vez *hubo* empezado la fotosintetización, por supuesto que los competidores nunca tuvieron la posibilidad de realizar el proceso, ya que el material orgánico quedó rápidamente encerrado en células vivientes, y cualquier cambio en el sistema —como la pigmentación roja— tuvo que esperar hasta mucho después.

Volvamos al inicio de la historia de la vida sobre la Tierra. Los primeros fotosintetizadores diferían de la mayoría de los actuales en un aspecto esencial: no "liberaban" el oxígeno producido como residuo de la fotosíntesis, sino que lo convertían, en combinación con otras moléculas, en un compuesto seguro y no reactivo antes de expulsarlo de la célula. Para estas primeras células vivientes, el oxígeno era un veneno que reaccionaba tan pronta y violentamente contra los compuestos orgánicos que podría descomponer el metabolismo de cualquier célula que lo dejara libre en su forma más pura.

Cuando aparecieron las primeras células adaptadas a la vida con oxígeno, se encontraron con una enorme ventaja sobre otras formas de vida. En primer lugar, ya no les era imprescindible reconvertir el oxígeno antes de liberarlo; en consecuencia, es evidente que dicho oxígeno no benefició a las otras clases de células circundantes y que no habían aprendido a tolerarlo. Una vez aparecidos los productores de oxígeno, debieron de establecerse con mucha rapidez por todos los océanos del mundo, y variadas evidencias muestran que la principal transición que va desde la existencia de una atmósfera con oxígeno

libre a otra con sólo el 1%, como es la actual, se produjo en unos pocos cientos de millones de años, hace aproximadamente 2.000 millones de años.

Tenemos una evidencia geológica en los depósitos de mineral uránico (UO_2) hallados en algunas viejas rocas precámbricas. Si hay oxígeno libre, este mineral se oxida con facilidad para transformarse en un óxido de uranio con más átomos de oxígeno por átomo de uranio, U_3O_8, de manera que no podía haber oxígeno libre por los alrededores cuando se formó el depósito, y todos son anteriores a los 2.000 millones de años. Pero la mejor evidencia radica en los depósitos de óxidos de hierro, encontrados en cualquier punto del planeta, y que constituyen la principal fuente de obtención de hierro. Se conocen con el nombre de *Banded Iron Formations* (BIF) y tienen una edad que oscila entre los 1.800 y los 2.200 millones de años. La más plausible explicación de cómo llegaron a depositarse es que en el océano primigenio de la Tierra, carente de oxígeno, el hierro estaba disuelto en su estado ferroso. Cuando apareció el oxígeno, se puso en marcha una conocida reacción que involucraba tanto al hierro como al agua, de forma que toda la solución ferrosa se convertía en óxido férrico insoluble que se depositaba en gruesos estratos en el fondo oceánico. La conocida reacción química que involucra hierro, oxígeno y agua, y que produce el característico óxido férrico rojo-marrón, se denomina oxidación. Con la aparición del oxígeno sobre la Tierra, todo el hierro se oxidó. Para conseguir esto en tan breve tiempo —unos pocos cientos de millones de años— debió de haber un buen propagador de oxígeno de algunas de las nuevas fuentes, y sólo la fotosíntesis aeróbica (la fotosíntesis que libera oxígeno) puede mostrar el camino que tomaron los hechos.

Muchas de las materias orgánicas que hicieron la fotosintetización tuvieron que ser enterradas a su muerte, o su descomposición se habría servido del oxígeno creado cuando todavía estaba viva. Los entierros en el fondo del océano han sido siempre lo más común en el caso de los escombros orgánicos que no han sido devorados por otros organismos vivientes. Y, por

descontado, el nivel de oxígeno en la atmósfera sólo pudo empezar a establecerse cuando los BIF quedaron depositados, puesto que, antes de que todo el hierro se oxidara, el oxígeno era atrapado en el óxido tan pronto como se producía. De modo que la historia del Precámbrico, y de la influencia de la vida precámbrica en nuestro planeta, es definitiva, al menos en cuanto ahora la conocemos. Los primeros organismos fotosintetizadores, las procariotas anaeróbicas, tienen una antigüedad de 3.000 millones de años. La invención de la fotosíntesis aeróbica, de poco más de 2.000 millones de años, concede a los organismos aeróbicos cierta ventaja; debieron de salir de las primeras formas de vida, mientras se oxidaba todo el océano y luego se transformaba la atmósfera. Las células eucariotas se desarrollaron hace 1.500 millones de años en un medio ambiente estable y rico en oxígeno, después de que tal transformación se hubiera completado y en seguida diversificado. Hace alrededor de mil millones de años, la reproducción sexual —una invención clave, como veremos muy pronto— fue descubierta, y durante los siguientes 400 millones de años se produjo una mayor di versificación, que dio lugar a muy distintas especies al final del Precámbrico.

Desde entonces, los cambios han sido rápidos. En parte, ello es debido a la energía de que disponen los organismos capaces de utilizar oxígeno para la respiración, energía que les permite invadir nuevos nichos ecológicos y competir entre ellos (tanto en el sentido de evolución como en el sentido ordinario de la palabra) para la obtención de comida. En parte, también, por la invención de la reproducción sexual, que posibilita el que se extienda la diversidad de las especies. Y, finalmente, porque, bajo el paraguas protector del ozono en la nueva atmósfera rica en oxígeno, la vida se “aficionó” a la tierra firme, un nuevo hábitat con unas nuevas formas de presión selectiva operando sobre las especies.

UN ESCUDO ATMOSFÉRICO

Antes de centramos en las razones biológicas de esa variedad de vida sobre la Tierra, es oportuno ver la naturaleza de la atmósfera que hemos heredado de la época precámbrica, una atmósfera no sólo rica en oxígeno, sino estructurada a base de capas, que nos protegen de la fuerte radiación ultravioleta del Sol, la cual podría hacer inhabitable la superficie terrestre. La vida alteró el medio ambiente precámbrico más que cualquier otro proceso físico, y aún hoy vivimos gracias a los beneficios de nuestras antecesoras las cianobacterias, de hace más de 2.000 millones de años.

La estructura de la atmósfera resulta muy simple en términos de temperatura. Calentado por energía solar, el suelo irradia calor hacia el espacio en longitudes de onda infrarrojas. Parte de este calor es atrapado por el efecto de invernadero; las nubes, la nieve y las superficies terrestres y marina reflejan otra parte hacia fuera. A pesar del equilibrio conseguido, de vez en cuando se producen algunas pequeñas variaciones en dicho equilibrio, suficientes como para producir el esquema de repetición de períodos glaciales y épocas calientes característicos de los pasados cien millones de años. La capa más baja de la atmósfera es la troposfera y, a través de ella, la temperatura desciende 6°C por cada kilómetro de altitud que se gana. El descenso de temperatura empieza a detenerse hacia los 10 km de altitud y se detiene totalmente a los 15 km. Entre los 20 y los 50 km, la temperatura aumenta con la altitud, desde un mínimo de –60°C hasta los 0°C como máximo en la parte alta de esta capa, la estratosfera. Este calentamiento indica que se absorbe energía en la estratosfera: las moléculas que generan la energía son las del ozono, una forma de oxígeno molecular con tres átomos por molécula (O_3) en vez de los dos que son usuales (O).

	Era geológica	Período geológico	Época
Hoy	Cenozoico (aprox. el 1,5 % de la historia de la Tierra)	Cuaternario (hace 3 mill. años)	Holoceno (hace 11.000 años) Pleistoceno (hace 3 mill. años)
		Terciario (hace 65 mill. años)	Plioceno (hace 7 mill. años) Mioceno (hace 25 mill. años) Oligoceno (hace 40 mill. años) Eoceno (hace 60 mill. años) Paleoceno (hace 70 mill. años)
70 mill. años	Mesozoico (aprox. el 3 % de la historia de la Tierra)	Cretácico (hace 135 mill. años) Jurásico (hace 190 mill. años) Triásico (hace 225 mill. años)	
230 mill. años	Paleozoico (aprox. el 8 % de la historia de la Tierra)	Pérmico (hace 285 mill. años) Carbonífero (hace 350 mill. años) Devónico (hace 400 mill. años) Silúrico (hace 440 mill. años) Ordoviciense (hace 505 mill. años) Cámbrico (hace 570 mill. años)	
Aprox. 570 mill. años	Precámbrico (aprox. el 90 % de la historia de la Tierra)		

Las divisiones geológicas del tiempo. Las fechas marcan el comienzo de cada subdivisión; éstas han sido expresadas en números redondos, por lo que no necesariamente suman lo mismo en cada columna. Las imprecisiones que afectan a la datación de las divisiones son mayores que las diferencias de tiempo que se constatan en las columnas, y resulta aceptable, por ejemplo, al referirse al final del Mesozoico hablar de "unos 65-70 millones de años", en lugar de utilizar la incierta cifra exacta de 65 millones de años o de 70 millones de años.

En la estratosfera, una serie de reacciones químicas dinámicamente interrelacionadas y conducidas por la luz solar (reacciones fotoquímicas) producen el ozono. Las moléculas de oxígeno diatómicas ordinarias se dividen en átomos en la

medida en que absorben la energía ultravioleta del Sol, y la eficiencia con que se producen los átomos de oxígeno libres depende del equilibrio entre el número de moléculas a dividir (más a menor altitud) y la cantidad de energía ultravioleta disponible (más a mayor altitud). Una vez producidos estos átomos, se combinan con otras moléculas diatómicas para dar como resultado ozono, O_3 Debido a los factores que afectan al índice de las reacciones fotoquímicas, las concentraciones de ozono son mayores en la banda de la estratosfera situada entre los 20 y los 30 km de altitud, y el ozono, especialmente en dicha banda, también absorbe las ondas electromagnéticas de una longitud de onda de 2.800 Å o menos, con lo que frena esta radiación ultravioleta antes de que entre en contacto con el suelo. El ozono se rompe de una manera constante en oxígeno diatómico y átomos de oxígeno simple, pero la capa de ozono también es constantemente rellenada. Aunque las moléculas individuales no permanecen en un único estado, la verdad es que se mantiene cierto equilibrio, como el de un cubo agujereado que no cesa de recibir agua de un grifo. El agua corre a través del cubo, entrando y saliendo, pero el nivel de agua que queda dentro es siempre más o menos el mismo.

La serie de procesos interactivos que mantiene la capa de ozono se ve afectada por los cambios ocurridos en la radiación solar, de modo que la concentración de ozono varía según sea de día o de noche, con las estaciones del año, y según el ciclo de manchas solares de la propia actividad solar. Se ve asimismo afectada por la presencia de otros elementos y compuestos químicos en la estratosfera, y los óxidos, tanto de cloro como de nitrógeno, pueden ser muy eficaces a la hora de mudar el equilibrio de forma que la cantidad total de ozono en la estratosfera se reduzca —por ello se ha hablado mucho de los posibles efectos nocivos que sobre la estratosfera tiene la contaminación procedente de varias fuentes, entre ellas los óxidos de nitrógeno liberados con el uso masivo de fertilizantes, y los gases de cloro, flúor y carbono empleados en algunos *sprays* como "propulsores" que empujan hacia fuera el útil (?) producto, jabón de afeitar, desodorante, o lo que sea.

Encima de la estratosfera hay otra capa fría, la mesosfera, y en la parte superior de la misma (a unos 80 km de altitud) la temperatura es de –100°C. Desde aquí hacia arriba —o hacia fuera— la temperatura deja de ser una buena guía para conocer las condiciones del resto de la atmósfera; hacia los 500 km las colisiones entre átomos y moléculas son demasiado raras para considerarlas como un gas continuo, mientras que las franjas exteriores son descritas según sus propiedades eléctricas, dependiendo de la extensión en que los átomos se hayan ionizado. Para nosotros, no obstante, lo que importa es la troposfera, en la cual vivimos, así como la estratosfera que está inmediatamente encima, que actúa a modo de "tapadera" sobre la troposfera (porque el calentamiento de la capa detiene la convección, de manera que las nubes y el clima sólo tienen lugar en la troposfera que hay debajo) y nos protege de los rayos ultravioletas[52]. La determinante importancia de este escudo la señala el hecho de que la radiación ultravioleta se emplea habitualmente para esterilizar utensilios como los del equipo de operaciones de los hospitales, los cuales deben estar libres por completo de formas de vida tales como las bacterias. Siempre cabe especular sobre la posibilidad de que la vida evolucione en presencia tanto de oxígeno como de radiación ultravioleta, pero la radiación no sólo es perjudicial porque "queme" (las quemaduras de sol son debidas a rayos ultravioletas que consiguen atravesar la capa de ozono). La energía electromagnética en esta banda de onda es especialmente dañina para el ADN —la "resonancia" es tan fuerte que las moléculas se rompen o se deterioran—. Esta es la razón por la que la radiación ultravioleta se halla implicada en el cáncer de piel, que es un resultado de errores cometidos en la división y crecimiento de las células, motivados por la falta de replicadores ADN. El ADN de las formas de vida primitivas, que carecían de una piel fuerte, debió de verse muy

---

[52] Toda la circulación y el clima de la atmósfera debieron de ser muy diferentes antes de que esa "tapadera", hecha de ozono, se desarrollara. Quizá sea ésta otra de las razones por las que la vida no podía asentarse sobre una Tierra que no poseía una atmósfera de oxígeno.

afectado por esta clase de problemas, tanto, que la vida tuvo que desarrollarse en el mar (que, en cualquier caso, es donde todas as moléculas orgánicas fueron disueltas). Quizás una criatura de concha gruesa que viviera en aguas poco profundas y a la que no afectara demasiado la radiación ultravioleta, pudo eventualmente haber colonizado la tierra, aunque luego, a lo peor, no hubiera encontrado nada que comer: no obstante, una vez establecida la capa de ozono, el peligro desapareció y algunas plantas con una piel en cierto modo delgada fueron capaces de prosperar en la tierra para ser luego emuladas por algunos animales.

Mientras algunas interesantes evoluciones seguían teniendo lugar en el mar, es de estas criaturas que invadieron la tierra de las que nosotros descendemos, y es su historia la que tiene que ser estudiada si queremos rastrear los orígenes de la humanidad. Habiendo tomado prestado el título de este capítulo de Charles Darwin, podría parecer desequilibrado si lo terminara con la llegada de la diversidad de formas de vida, como lo indican los fósiles de principios del Cámbrico, hace 600 millones de años. Pero el propio Darwin escribió que «a la pregunta de por qué no encontramos depósitos de restos fósiles pertenecientes a... períodos anteriores al sistema Cámbrico, no le puedo dar una respuesta satisfactoria», e incluso fue más lejos diciendo que esto «puede ser verdadero como argumento» contra la teoría de la selección natural. La historia del Precámbrico delineada aquí muestra que tal argumento es falso, y que, realmente, la selección natural operó durante el Precámbrico, donde se sientan los orígenes de las especies que hoy se ven sobre el planeta. El relato del último 10% de la historia total de la Tierra, el desarrollo de la vida durante el Cámbrico y también posteriormente, es el relato de una explosiva divergencia de la vida, en comparación con el lento progreso de los anteriores dos o tres mil millones de años, encaminado hacia una desconcertante variedad de formas. Las mismas “reglas” biológicas y evolutivas que operaron para producir las primitivas especies, tales como la división entre eucariotas y procariotas, son las mismas que han producido esta diversidad de la vida

multicelular. Ha llegado, pues, el momento de examinar con más detalle esas reglas, así como los orígenes de la diversidad de vida asentada actualmente sobre tierra.

VII. LOS ORÍGENES DE LA DIVERSIDAD

La velocidad con que la vida se diversificó hace unos 1.500 millones de años se debe, en gran parte, a la presencia de oxígeno en la atmósfera y al invento de la respiración como medio para obtener energía. Con todo, la diversificación de la vida que vemos hoy a nuestro alrededor depende con mucho de otra invención biológica[53], la reproducción sexual. Si usted se fija en la variedad de vida que encuentre en su entorno, la práctica totalidad de lo que vea se reproduce sexualmente; serán precisas dos clases de "padres" para producir una nueva generación de "copias" del organismo. La reproducción asexual, en la que un ser genera por sí solo una copia exacta de sí mismo, está circunscrita al mundo de los seres todavía unicelulares, como nuestros antecesores precámbricos, si bien algunas pocas especies visibles, como el pulgón y varias especies de plantas, son tan capaces de reproducirse sexual como asexualmente. El sexo, es claro, representa una gran ventaja en el juego de la selección natural, y ha existido, en números redondos, desde los últimos mil millones de años. Los registros fósiles de los primeros animales conocidos —medusas, gusanos y corales— datan de hace entre 650 y 700 millones de años, pero la complejidad de estos organismos multicelulares muestra que fueron fruto de procesos evolutivos iniciados cientos de millones de años antes de su aparición. De modo que cualquier estudio sobre la diversidad de la vida sobre la Tierra, y del camino evolutivo particular que llevó al origen del hombre, debe empezar unos cien mil millones de años antes del término del Precámbrico. No sabemos con exactitud cómo ni dónde surgieron los

[53] Recuérdese que "invención" se utiliza aquí como forma abreviada de «sucesión de accidentales mutaciones favorables (copia de errores) que da lugar a organismos más eficaces para la supervivencia y reproducción que sus competidores». No hay ninguna planificación del proceso.

primeros antecedentes multicelulares de reproducción sexual de los que ahora son animales de tierra, aunque podemos adivinar cómo se desarrolló la reproducción sexual y por qué tuvo tanta fortuna. Sí sabemos, sin embargo, que, así como los factores biológicos afectan a la proporción de cambios evolutivos y a la diversificación de la vida al final del Precámbrico y durante el Cámbrico, hubo también cambios en el medio ambiente físico que debieron de desempeñar un papel importante por las presiones evolutivas que los mismos causaron.

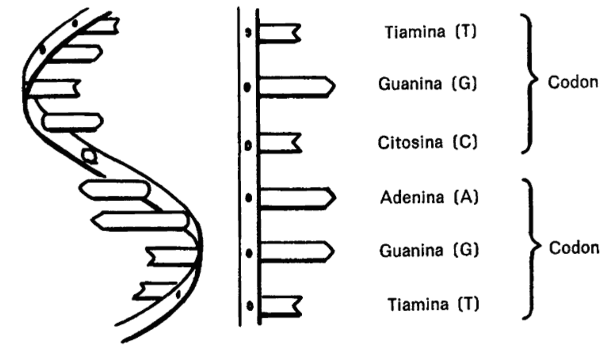
En la historia que sigue> menudearán las divisiones del tiempo geológico. La división principal se da en eras, con el Paleozoico, de 375 millones de años y que termina hace unos 225 millones de años, inmediatamente después del Precámbrico. El Mesozoico cubre un tiempo que va desde los 225 millones de años a los 65 millones: y la era presente, el Cenozoico, cubre los últimos 65 millones de años. Dentro de la vasta era paleozoica existe una subdivisión en períodos: Cámbrico, Ordoviciense, Silúrico, Devónico, Misisipiense, Pensilvaniense y Pérmico, teniendo en cuenta que durante un tiempo los períodos Misisipiense y Pensilvaniense estuvieron unidos en uno, el Carbonífero, hasta que estudios de las rocas de América del Norte aconsejaron la subdivisión. Hasta cierto punto, podríamos decir que el Paleozoico está dividido en una primera parte temprana (Cámbrico, Ordoviciense y Silúrico) y en una segunda tardía (Devónico, Misisipiense, Pensilvaniense y Pérmico). Esta división a gran escala se relaciona —según sabemos ahora— con los cambios físicos que han tenido lugar en la superficie de la Tierra, cambios que fueron particularmente importantes para la vida sobre la Tierra de aquel tiempo.

El primer Paleozoico corresponde al rompimiento de Pangea I, y el Paleozoico más moderno al reagrupamiento de los continentes en Pangea II. Como ya se dijo en el capítulo 4, el rompimiento de un continente conduce de manera inevitable a una diversificación de la vida, debido tanto a la aparición de un nuevo medio ambiente y destrucción del antiguo, como al hecho de que grupos de organismos vivos de los lugares someros de las costas ven roto su contacto en esas zonas, pasando a un

nuevo continente. Los dos grupos pueden, a partir de entonces, seguir caminos evolutivos separados. En el capítulo 4 ya expliqué en qué consistía la evolución y la diversificación de la vida, mientras utilizaba la evidencia de los cambios en los registros fósiles para apoyar la idea de la fragmentación de Pangea I; ahora, por fin, puedo volver a aquel cabo suelto, una vez asentadas las bases geofísicas, para reanudarlo y terminarlo de un modo adecuado, explicándolo desde el punto de vista de la vida. Es importante recalcar que durante un largo período que empezó hace menos de mil millones de años, habiéndose inventado el cuerpo multicelular y la reproducción sexual, la vida pudo implantarse físicamente muy bien. La Tierra entró en una considerable calma, comparada con su violenta y turbulenta juventud, y en el primer Paleozoico parece que hubo un período de quietud relativamente largo, en sentido geofísico. Siguió una época de hielos que afectó a buena parte del globo (muchos sugieren que el frío de esta época de hielos fue uno de los factores que hicieron de la posesión de una concha una ventaja evolutiva, lo que nos condujo a la gran variedad de restos fósiles que marcan el comienzo del Cámbrico). Así que la frontera Precámbrico/Paleozoico escogida en razón a los cambios biológicos indicados por los restos fósiles “parece” que se halla unida a cruciales sucesos geofísicos: el final de una época de hielo y el rompimiento de Pangea I. Naturalmente, esto no es ninguna coincidencia. La historia de la vida sobre la Tierra está en íntima ligazón con los cambios geofísicos, y la gran diversificación del Paleozoico tuvo lugar en un mundo que se estaba calentando tras una época de hielos, con masas de tierra que se separaban para proporcionar variados hábitats para la vida. Pero fue gracias al sexo, tanto como al resto de factores, por lo que la vida fue capaz de explotar esa particular oportunidad, agarrándose a ella, por decirlo de algún modo, con las dos manos.

EL ÉXITO DEL SEXO

Para entender por qué la reproducción sexual goza de tanta ventaja, tenemos que volver a la reproducción molecular, donde el ADN es copiado y transferido de generación en generación. Una molécula de ADN, con sus filamentos dobles en espiral emparejados con enlaces químicos que enlazan parejas particulares de moléculas, se parte por la mitad para formar dos filamentos simples. Posteriormente, cada uno de ellos reconstruye sus respectivas dobles hélices seleccionando nucleótidos del material biológico que lo rodea. Los cuatro componentes que constituyen el alfabeto de cuatro letras (*A*, *C*, *G* y *T*) del ADN sólo forman dos clases de enlaces:



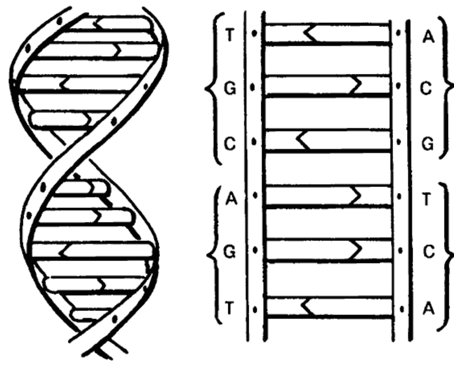
Un grupo de tres "letras" del alfabeto del ADN se denomina codon, y corresponde a un determinado aminoácido.

A siempre con *T* y *C* siempre con *G*. De modo que si una hélice no está atada, un enlace roto puede abandonar a *A* en un lugar determinado de una molécula y a *T* en su correspondiente lugar de la otra. La *A* sólo se recombinará con otra *T*, y la *T* sólo con otra *A*, de manera que los dos filamentos simples (ambos son la mitad de uno entero) se recomponen en una nueva molécula ADN, igual a la original. Es como si de un par de zapatos, separados y arrojados sobre un montón de zapatos viejos, cada uno se emparejara con otro diferente creando una nueva pareja, el izquierdo con un nuevo derecho y el derecho

con un nuevo izquierdo. Es, sin embargo, un poco más complicado en el caso del ADN, donde cientos de miles de anillos, que contienen millones de nucleótidos, tienen que ser desemparejados, separados y vueltos a emparejar, tratándose de una bacteria, todo en veinte minutos, que es el tiempo que tarda una célula en dividirse.

Cuando el ADN transmite mensajes sobre el funcionamiento de la célula o del cuerpo en que habita en la forma de instrucciones de cómo construir moléculas proteínicas, el proceso resulta algo diferente. Lo que ocurre entonces, según parece, es que sólo parte de la molécula se “desata”, dejando un lazo libre de ADN con las bases de su código de cuatro letras expuestas durante una secuencia, deletreando un determinado mensaje. Esto actúa como de plantilla para la construcción de una molécula ARN (por razones obvias, llamado ARN “mensajero”) fuera del grupo químico de material celular, el pequeño y caliente estanque que las células todavía conservan desde los tiempos del caldo primitivo. El ARN (ácido ribonucleico) es similar al ADN, pero no del todo idéntico; en concreto, utiliza una base diferente (*U* en vez de T) en su código de cuatro letras. Cuando el ADN deletrea *ATA*, por ejemplo, el ARN copiado del ADN deletrea *UAU*. Pero esto la célula ya lo “sabe”, por ello no causa ningún problema; la completa molécula de ARN es liberada por la de ADN, que cómodamente vuelve a su forma original, y el mensaje de ARN se utiliza luego para controlar la construcción de las proteínas necesitadas en cada momento. Tal como ocurre, es una historia larga y fascinante, pero desde la perspectiva de la evolución no reviste demasiado interés para que ahora me entretenga en proseguirla; lo que importa es que el ADN pasa los mensajes que mantienen el cuerpo en funcionamiento, y que, más importante todavía, controla el crecimiento del cuerpo a partir de una simple célula. Si el ADN transferido a la célula de la siguiente generación contiene el error de copia, el descendiente entonces será diferente a sus padres. Muy a menudo estas mutaciones son perjudiciales, el descendiente muere o tiene más dificultades para reproducirse, y esto resulta el final de la historia. A veces, no

obstante, el error es un avance que hace más fácil la reproducción del descendiente de lo que fue para sus padres, así como favorece otras relaciones, en cuyo caso son los progenitores los que mueren o se ven obligados a vivir en un determinado medio ambiente donde todavía pueden sobrevivir formas de vida antiguas, como ocurre en los mares salados de Sharks Bay.

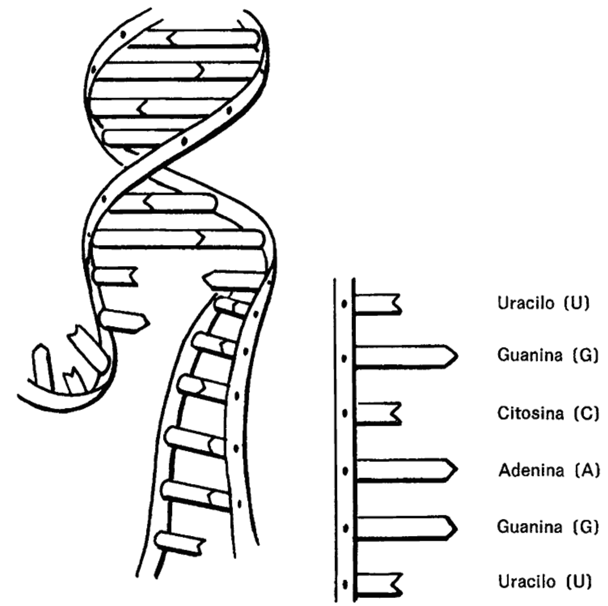


Cada filamento individual de la molécula vital del ADN puede ser considerado como la columna vertebral a la que se adosan las ramas laterales *A*, *G*, *C* y *T*. La molécula de ADN completa, compuesta por dos filamentos, se dispone como una doble hélice con las ramas laterales opuestas unidas para formar los "peldaños" de una "escalera helicoidal". Si imaginamos la espiral desenrollada de modo que recobre la forma de una simple escalera, es más fácil apreciar cómo se enlazan las partes opuestas. La rama *A* sólo puede emparejarse con la *T*, y la *G* sólo con la *C*. De este modo, aunque cada una de las cuatro ramas tiene una longitud diferente, todos los peldaños posibles (*AT* o *GC*) resultan de la misma longitud, y todas las unidades de la escalera encajan perfectamente.

Nosotros tenemos en nuestras células una cantidad mayor de ADN que nuestros antepasados unicelulares del Precámbrico. El material extra se ha construido a base de errores en los que segmentos de ADN se han duplicado por errores que han encauzado el "aprendizaje" del ADN "extra" para que sea capaz de realizar un trabajo útil. Al mismo tiempo, segmentos de ADN pueden haberse perdido, de modo que no tiene por qué ser exclusivamente más "avanzada" una célula con más ADN,

evolutivamente, que otra con menos. Pero las reglas de la reproducción son semejantes, se tenga más o menos ADN, de modo que, una vez más, será mejor echar una ojeada a ejemplos modernos para descubrir cómo funciona la evolución, esperando que en tal evolución se haya jugado con las mismas reglas desde que existe vida en la Tierra, y, muy en particular, desde que existe la reproducción sexual en la Tierra. El ADN está formado por cromosomas (cuarenta y seis en el hombre, cuarenta en el ratón y, por si ello le hace sentirse superior, cuarenta y ocho en la patata), y los cromosomas están constituidos por subunidades llamadas genes. Los genes están hechos de ADN y transportan mensajes específicos en el alfabeto de cuatro letras (*A*, *T*, *C* y *G*) propio del ADN. Cada célula del cuerpo es portadora de los planes del ADN que describen la construcción, cuidados y mantenimiento de todo el cuerpo, si bien todavía desconocemos cómo el control y la liberación de ciertas proteínas hacen que sean diferentes las células de un ser humano, las de un ratón o las de una patata. Un gen puede transportar un mensaje elemental, como el que determina el que se tengan ojos azules, pero, por regla general, cada gen afecta a diversas partes del cuerpo y de manera desigual; cada parte del cuerpo está construida de acuerdo con una combinación de instrucciones de los diferentes genes. Éste, junto con las estupendas posibilidades combinatorias de genes que la reproducción sexual permite, es el motivo por el que las personas son tan distintas unas de otras. Para simplificar podemos decir, pues, que los genes son los componentes básicos del código que describe cómo se construye un cuerpo (código genético), y podemos pensar que cada gen, o grupo de genes, es portador de un mensaje tan elemental como el de "ojos azules", "piernas largas" o "piel oscura". Los errores en la copia de los genes —mutaciones genéticas— ocurren en todo momento y, aunque hay una enorme presión selectiva para copiar con exactitud, existe también un enorme número de copias de cada gen. Con 4.000 millones de seres humanos sobre la Tierra, por ejemplo, prácticamente cada gen aparece de una forma mutada en un

cuerpo humano u otro, aun cuando casi 4.000 millones de copias perfectas de cada gen están también presentes en el "patrimonio genético" de la humanidad. O, mejor, no los 4.000 millones de copias de cada *gen,* puesto que debe de haber distintas versiones del gen, por ejemplo, del color de los ojos.



Para controlar el funcionamiento de la célula (y del cuerpo), una sección del ADN se separa y se desenrolla. Los peldaños rotos de la escalera actúan entonces como molde sobre el que se forma una cinta de ARN mensajero. Éste imita con exactitud la imagen de espejo de la cinta de ADN, con la diferencia de que la base *U* sustituye a la base *T*. El ARN mensajero actúa de fundamento para la construcción de aminoácidos, mientras que el ADN vuelve a cerrarse de nuevo como una cremallera.

Cada ser humano transporta cuarenta y seis cromosomas, veintitrés de cada progenitor. De modo que cada ser humano tiene dos grupos de genes, y el gen del color de los ojos heredados de la madre puede decir "marrón", mientras que el del padre puede decir "azul". En este caso particular, el ser humano

construido según estos planes del ADN no tendrá un ojo marrón y otro azul; el gen azul es "recesivo" y el marrón "dominante", de manera que en la práctica, los dos ojos serán marrones y el gen azul quedará ignorado. Tales genes "competitivos", que ofrecen formas divergentes de construir un cuerpo humano, reciben el nombre de "alelos"; en el ejemplo del color de los ojos hay otros "alelos" en el patrimonio genético, aunque cada individuo sólo puede tener dos, uno de cada progenitor. Evidentemente, los dos pueden decir lo mismo —ordenar "ojos azules", por ejemplo—, en cuyo caso no hay conflicto. Cada uno se ha producido por mutación de una versión previa del gen, y es muy posible para un elevado número de genes mutados —"alelos"— existir en la población de una misma especie. Ésta es una característica clave del mecanismo de la evolución. Pequeños cambios continuados en los genes hacen que haya variedad; si las circunstancias cambian tanto que un "alelo" particular resulta favorecido, se extenderá con rapidez por el patrimonio genético, desplazando a sus rivales, porque los cuerpos en los que viven mueren jóvenes o fracasan en el intento de reproducirse. Una nueva población, una variación en la forma de las especies, queda establecida, y luego, el lento proceso de la evolución creará versiones diferentes, nuevos "alelos". Las mutaciones no suceden repentinamente, produciendo espectaculares alteraciones físicas en el cuerpo del nuevo individuo, comparado con el cuerpo de sus padres. Tampoco tienen lugar las mutaciones "en respuesta a" los cambios ecológicos; los cuerpos de los animales del final del Precámbrico no "sabían" que el tiempo se estaba enfriando, o que había más depredadores, sin embargo les nacieron conchas de protección. Sin duda debieron de tener un "alelo" de piel dura en competencia con otro de piel más débil. Cuando el clima cambió, o se extendieron los depredadores, los individuos de piel débil murieron, y sólo los poseedores de piel dura lograron sobrevivir. La repetición de tal proceso a través de muchas generaciones ha producido animales con conchas duras.

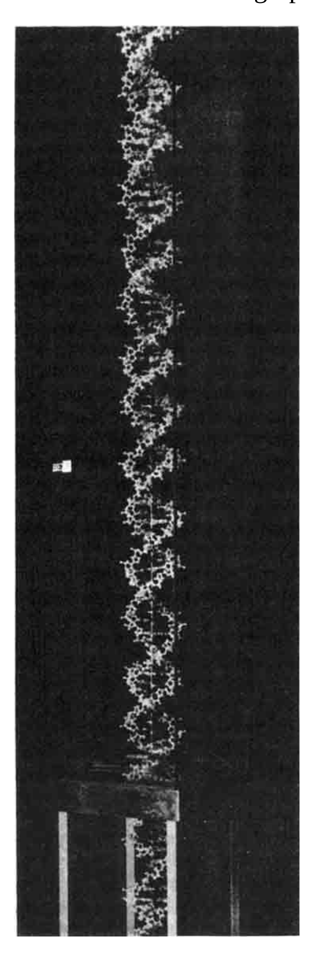
Tomemos un hipotético ejemplo humano. Aun cuando el "alelo" de ojos azules es recesivo, se ha prodigado aparte de la

población humana, y puede estar presente incluso en personas de ojos marrones. Supongamos que algún cambio en la naturaleza de la radiación del Sol da una ventaja a los ojos azules (no es muy probable en el ambiente protegido de nuestras grandes ciudades, pero sí bastante plausible para los cazadores de las planicies herbosas). En tal caso, los ojos azules se extenderían con mucha rapidez; los "ojos marrones" quizá morirían por inanición porque no verían bien para cazar, y, haciendo las cosas un poco más complicadas, si alguien con ojos marrones tuviera un hijo de ojos azules sobreviviría si su hijo cazara lo suficiente para los dos, mientras que una persona de ojos marrones cuyo hijo también fuera de ojos marrones no podría subsistir.

Cuanta más variedad genética haya en una población, mejor podrá adaptarse a las circunstancias cambiantes. (La adaptación, en este sentido, significa que todos los miembros de la población con genes inadecuados mueren y los que sobreviven siguen adelante. La supervivencia de los genes es el proceso dominante y la fuerza conductora de la evolución.) Y la reproducción sexual es el método más eficiente de los conocidos para asegurar la variedad genética en una población.

Cuando las células se dividen para producir un cuerpo en crecimiento, los cuarenta y seis cromosomas —o mejor, los veintitrés pares de cromosomas— son copiados por duplicado, una mitad para cada una de las células resultantes de la división. Este proceso de división celular se denomina mitosis y es casi idéntico a aquel por el cual un organismo unicelular hace copias de su ADN antes de partirse en dos (la principal diferencia estriba en que mientras estas dos células siguen una vida independiente, en el caso de los organismos multicelulares las dos células se juntan y colaboran en la formación de un todo mayor). No obstante, en el primer estadio de la reproducción sexual tiene lugar una forma distinta de división celular denominada meiosis. En la división celular meiótica, partes enteras de cromosomas son separadas e intercambiadas en parejas para formar nuevos cromosomas que contengan los mismos genes

que los padres, pero reorganizados en una combinación distinta. Entonces la célula se divide, sin copiar los cromosomas, en un proceso de dos fases del que resultan células sexuales (espermatozoides o huevos en los animales), cada una de las cuales sólo contiene un grupo de veintitrés cromosomas.



Este modelo de la molécula de la vida, el ADN, muestra con toda claridad cómo las dos hélices se hallan unidas mediante moléculas que forman los "peldaños" de la escalera en espiral. *Copyright del British Museum (Natural History).*

Debido a la gran longitud de los cromosomas y a la cantidad de material genético que contienen, este proceso de separar partes de un cromosoma e intercambiarlas con material procedente de otro, origina una enorme variedad de nuevos cromosomas, y virtualmente no hay ninguna posibilidad de que entre dos espermatozoides u óvulos producidos por un mismo individuo coincidan idénticas instrucciones sobre cómo debe ser construido el nuevo individuo. El proceso de intercambio es calificado con acierto de “entrecruzamiento”; una buena analogía podría ser el barajar un juego de cartas, aunque la analogía más atinada sería la de barajar dos juegos de cartas y luego intercambiar cartas de los dos juegos. Esto asegura que cada generación tenga nuevos modelos de reorganización genética a partir de la variedad de cromosomas disponible. Entre otras cosas, quiere decir que aunque, en principio, usted pueda examinar el material de una de sus propias células e identificar los veintitrés cromosomas que proceden de su madre y los veintitrés que proceden de su padre, los exámenes similares que se hagan de los veintitrés cromosomas de una de sus células sexuales no nos dirimirán de cuál de sus progenitores proceden. Las veintitrés contienen parte del ADN de ambos, es decir, de los abuelos del nuevo ser humano que se desarrollaría si aquella célula sexual se fundiera con una del sexo opuesto.

Éste, desde luego, es el siguiente estadio de la reproducción sexual. El organismo no puede reproducirse por sí solo, sino que debe encontrar un miembro del sexo opuesto con el que aparearse. Cuando ello ocurre, dos células sexuales, cada una con veintitrés cromosomas, se fusionan y consiguen una célula de cuarenta y seis cromosomas emparejados. El proceso de construcción de un nuevo cuerpo ya puede empezar, con los detalles específicos de cada estadio de la construcción leídos por un miembro de un par de cromosomas de acuerdo con que el “alelo” de aquella particular fase de desarrollo sea dominante o recesivo sobre un cromosoma u otro.

Hay desventajas obvias en este método de reproducción; el dar con un compañero tal vez se haga dificultoso, y la necesidad de buscarlo puede exponer al organismo a unos peligros

que se evitarían de poder esconderse en algún lugar y reproducirse asexualmente. Desde el punto de vista de los genes egoístas de Dawkins, ello también significa —en términos genéticos— que cada padre contribuye sólo con la mitad de sus características a la formación del siguiente individuo, en vez de asegurar que la totalidad de sus genes pasen íntegros.

En suma, todo este rompimiento de cromosomas y entrecruzamientos de ADN es lo que permite que se produzcan errores en el proceso de copia.

RESPUESTA FLEXIBLE

Pero todo ello, al final, puede resultar ventajoso si se logra la suficiente variedad como para asegurar una respuesta flexible a los cambios acelerados en las condiciones ambientales, pero no tanto como para que al descendiente le resulte difícil reproducirse. Claramente, las ventajas de la reproducción sexual superan las desventajas, si no, yo no estaría aquí escribiendo este libro y usted no estaría leyéndolo. La variabilidad es, con toda seguridad, la clave del éxito de la reproducción sexual, la variabilidad asegurada por todos los genes mezclados, y la provisión de dos juegos de cromosomas, con muchos "alelos" alternativos, de parte de los dos progenitores. Las circunstancias en las que la variabilidad es altamente ventajosa se ven observando las especies de plantas y animales capaces de reproducirse tanto sexualmente como asexualmente —es obvio que la evolución, a lo largo de cientos de millones de años, ha seleccionado tales organismos sobre la base de la eficiencia en su reproducción, y los supervivientes actuales deben ser los que utilizan el sistema de reproducción sexual de una manera eficiente. Resulta que el estadio de reproducción sexual se asocia siempre con la dispersión de los descendientes hacia nuevos e inciertos hábitats. Un ejemplo clásico nos lo proporciona el comportamiento de los parásitos que se reproducen con mucha rapidez, ocasionando una explosión de población en su mundo animal, por medio de la reproducción asexual. Pero cuando a los descendientes llega el momento de abandonar su mundo y

buscar otros lugares donde vivir, entra entonces en juego la reproducción sexual; en vez de crear descendientes idénticos, la nueva generación contiene la variedad que la reproducción sexual hace posible. Muchas de las nuevas variedades perecerán sin encontrar su medio; pero en la medida en que algunos, gracias a la mezcla de sus genes, consigan adaptarse bien al nuevo medio que escojan (o que les escoja a ellos), la especie sobrevivirá. Y, lo que es más importante, en tal caso los genes que controlan el modo de reproducción del parásito sobrevivirán también; a los genes no les "preocupa" el que la especie sobreviva o no, sólo que sean copiados tan a menudo y de la manera tan esmerada como sea posible.

Estos y otros estudios similares demuestran que la reproducción sexual es el mejor sistema para la adaptación de los genes a un nuevo o cambiante medio ambiente. Esta es exactamente la situación reinante en las postrimerías del Precámbrico y el comienzo del Paleozoico; la atmósfera de la Tierra estaba cambiando, con un incremento en la concentración de oxígeno; el clima cambiaba, entrando y saliendo de glaciaciones; y los propios continentes se movían, rompiendo Pangea I. Poca duda cabe de que la reproducción sexual recibió tal impulso, ya que durante 600 millones de años o más la reproducción asexual fue incapaz de competir. Desde el Precámbrico, han tenido lugar amplios cambios en el medio ambiente para asegurar que la reproducción sexual continuara siendo ventajosa durante mucho tiempo. No obstante, es interesante especular con que quizá hoy no suponga ninguna gran ventaja la reproducción sexual para los seres humanos. Tenemos un medio ambiente estable, comparado con los acontecimientos devenidos en la Tierra a lo largo de su historia, e incluso estamos aprendiendo a controlarlo según nuestras necesidades, evitando así tener que adaptamos a sus variaciones. (Si hace frío, ponemos en marcha la calefacción o nos cubrimos con un abrigo, sin que nadie muera de frío y dejando que los individuos más fuertes leguen sus genes de resistencia a las generaciones sucesivas.) Los riesgos de la reproducción sexual podrían muy bien superar las

ventajas, tal como son nuestros genes, aquí y ahora. El problema, desde el punto de vista de los genes, es que éstos han construido máquinas de subsistencia —los cuerpos— de tal complejidad que la reproducción humana asexual no cuenta con posibilidad alguna: la mutación necesaria sería tan extrema que la hace extraordinariamente improbable[54].

Esto resalta el problema principal, desde el punto de vista de los genes egoístas, de los grandes organismos multicelulares. Los cambios que se produzcan en el organismo tienen que ser sutiles y, más o menos, a distancia. El cuerpo se ha formado para que desempeñe su trabajo de reproducción y propagación de genes, pero los pormenores de cómo y cuándo realiza este trabajo se vuelven más complejos a medida que el organismo se vuelve también más complejo, abriendo la posibilidad de que los mejores planes de los genes se descarríen. Aun así, en tanto que el organismo no sea inteligente —y, sorprendentemente, cuando *es* inteligente—, los genes se las arreglan muy bien ellos solos, tal como prueban los nuevos estudios sobre las bases genéticas de la evolución.

SELECCION INDIVIDUAL

Lo más importante, en razón de su importancia para nuestra comprensión de la evolución, el origen de las especies y la expansión de la diversidad, sobre el concepto —por ahora finalmente establecido— de los genes egoístas, es que implica que

---

[54] Y es que además, por supuesto, los genes responsables de la reproducción sexual ya están satisfechos de cómo marchan las cosas. Al igual que todos los genes, no tienen ningún "deseo" de evolucionar y desaparecer, y aseguran su propia subsistencia pasando copias a las sucesivas generaciones. Los genes no están directamente interesados en lo que es mejor para la especie, ni siquiera en lo que es mejor para el individuo en el que habitan. Están interesados en hacer copias de sí mismos y en la selección natural de los más adaptados, entendida como supresión, a través de la supervivencia y la reproducción, de los individuos menos "adaptados", y. por extensión, de los genes menos "adaptados".

el trabajo de selección se haga a nivel individual. Es un individuo el que vive o muere, se reproduce o fracasa en el intento, y son los genes del individuo los que pasan (o no) a otro individuo (o individuos) en la siguiente generación. La vieja idea de selección de grupo, el que los individuos de una especie se comporten de acuerdo con las conveniencias del grupo, está desacreditada por completo. Y no es fácil decirlo cuando la idea de la selección de grupo ha sido tan espléndidamente popularizada por las series de libros de Robert Ardrey. Debe de haber una generación entera de no científicos, o incluso de científicos especializados en otros terrenos, que han detenido sus conocimientos sobre la evolución en general, y la humana en particular, leyendo los libros de Ardrey. En cierto modo, estos libros están soberbiamente escritos, y con una ingente información sobre el pasado. Lo que ya no es tan perfecto es su explicación del pasado en términos de selección de grupo, que, desafortunadamente, a duras penas es un error que pueda ser encubierto.

Así es que, en parte gracias a Ardrey, la idea de selección de grupo está muy arraigada en la mitología popular. La todavía popular idea consiste en que los individuos son meros "peones" en la lucha por la supervivencia que pueden ser sacrificados "por el bien de la especie", incluso llegando al suicidio individual si ello ha de servir de ayuda. El ejemplo clásico nos lo proporcionan los animales que con sus llamadas o signos de alarma alertan de la presencia de algún depredador, aun a riesgo atraer la atención del depredador sobre sí mismos. De fijo, se dirá, esto debe ser altruismo (¿arriesgándose mientras se deja que los otros escapen, por lo mismo que los humanos, en una emergencia, ganan medallas?). Claro que no. Este género de comportamientos pueden explicarse desde la perspectiva de la supervivencia de los genes que habitan en el cuerpo individual, asumiendo que ni los cuerpos ni los genes se preocupan por la supervivencia de la especie, sino sólo por la de los genes mismos. No obstante, esto da un significado ligeramente distinto al término "selección individual", puesto que son los

genes individuales, o grupos de genes, los que son seleccionados. Si uno individual muere, el hecho no reviste demasiada importancia para los demás genes, siempre que las copias de los genes individuales sobrevivan en otros cuerpos. Y a partir de esta sutilidad adicional, expertos como Richard Dawkins y John Maynard Smith tienden a explicar rarezas tales como llamadas de alarma y aparentes comportamientos suicidas.

Cada individuo, hay que recordarlo, hereda la mitad de sus genes de su madre y la otra mitad de su padre. De manera que hay un "parentesco" de 0,5 entre hijo y progenitor. Cada hijo recibe una mezcla proporcional de genes de sus padres, aunque no la misma mezcla en todos los casos; hay la misma posibilidad de que los hermanos (o hermanas) de un individuo tengan o no en común un gen particular, esto es, la proporción en que los hermanos comparten sus genes. De manera que los hermanos también tienen un parentesco de 0,5. La idea puede extenderse fuera de lo que es la familia inmediata: un sobrino, por ejemplo, tiene un parentesco de 0,25 con su tía, toda vez que ésta comparte la mitad de los genes con su hermano, que es el padre de su sobrino, y el padre comparte la mitad de los genes con su hijo. Y los primos hermanos, siguiendo con esos ejemplos, tendrían una relación de un octavo. En lo que a un gen individual concierne, dentro del cuerpo humano o de cualquier otro en el que viva, lo importante es ver qué copias de sí mismo pasan a la siguiente generación. En términos evolutivos, no importa que esos genes hayan pasado a un hermano, a un primo o a cualquier otro pariente más lejano. Y en tanto cada uno de ellos comparta la mitad de un gen individual, *todos* los genes de un individuo pueden preservarse si dos hermanos sobreviven y se reproducen. Esto es lo que hizo que J. B. S. Haldane dijera, hace más de veinticinco años, que «daría su vida por dos hermanos u ocho primos», algo que no debe tomarse al pie de la letra, pero que pone de relieve que si existe algún gen por razones altruistas —por ejemplo, el gen que alerta— no importa que el animal que da la alarma sea devorado, puesto que gracias a su acto "altruista", copias de *ese gen particular* quedan preservadas en los cuerpos de otros animales.

Esto, sin embargo, sólo puede aplicarse en un sentido estadístico y para un número razonablemente amplio de animales. Una pareja determinada de hermanos, por ejemplo, puede tener tan sólo el 40% de genes en común, o el 75%, o cualquier otra cifra. En cualquier caso, los otros animales no "saben" cuáles son sus hermanos o primos a la manera en que los animales humanos sí lo saben. Más importante todavía, ningún animal —ni siquiera humano— actúa, al ver a otro miembro de su especie en peligro, calculando primero qué clase de relación les une para, sólo luego, ofrecer el auxilio necesario. Fue Haldane, nuevamente, quien comentó en una publicación científica sobre genética de población que «en las dos veces que he sacado del agua a personas que se estaban ahogando... nunca tuve tiempo de hacer tales cálculos». Lo que sucede en realidad es que, a través de muchas y muchas generaciones, la evolución ha seleccionado a los genes que observan un comportamiento altruista para así favorecer la expansión de dicha clase de genes. Los genes "temerarios", que protagonizan espectaculares actos de heroísmo a la más mínima oportunidad, no suelen expandirse debido a que carecen de tantas posibilidades de reproducirse; los genes "tímidos", que nunca previenen a los otros miembros de la especie aunque el peligro sea ostensible, tampoco tienden a expandirse, porque el peligro evidente agobia tanto a la criatura tímida como a los de la misma especie que la rodean, los más íntimamente relacionados con ella. El gen que avisa del peligro, y que se comporta con prudencia, es el que mejor sobrevive de todos, sino en un cuerpo, pues mala suerte, pero todos sus parientes corren o vuelan hacia otro lugar, a vivir y a respirar otro día.

La conclusión evidente de que éste es el mecanismo básico de selección la obtenemos cuando hacemos números. Es posible hacer ecuaciones que describan el comportamiento, en términos matemáticos (estadísticos), de gran número de individuos que obedezcan reglas bien definidas, tanto si esos individuos son animales que emiten avisos de alarma, como si están implicados en exhibiciones de emparejamiento, como si son

moléculas que fabrican gas. Con ejemplos mucho más complicados que los que yo he dado, Maynard Smith, en particular, ha desarrollado modelos para determinar qué tipo de comportamientos "debe" dominar en la sociedad animal en diferentes circunstancias. La rama de las matemáticas utilizada por él y sus colegas es la denominada teoría de juegos, y posee una sólida base gracias a los esfuerzos realizados a lo largo de los años en varios intentos de simular guerras y de predecir la clase de estrategia de ataque o de defensa antes de ponerlas en práctica. En el centro de la aplicación que Maynard Smith hace de la teoría de juegos al comportamiento animal, está la idea de una "estrategia de la evolución estable", un modelo de comportamiento que persistirá en la población, aunque los individuos vengan o se vayan en el curso de muchas generaciones, porque cualquier estrategia alternativa que algunos individuos de la población sean capaces de desarrollar, no resultará tan buena como la estrategia estable de evolución.

ESTRATEGIAS PARA LA SUPERVIVENCIA

Esto tiene una particular importancia porque la aproximación de la teoría de los juegos trata a los individuos como a individuos que realizan lo que es mejor para ellos, no lo que es mejor para las especies; los individuos actúan por su propio bien. Lo que vemos, en el correr del tiempo, es una evidencia clara de que las especies, siguiendo pautas de comportamiento que al principio pueden parecer orientadas a su propio bien común, lo que hacen de verdad es lo mejor para cada individuo, y ello encaja a la perfección en el funcionamiento de la estrategia estable de evolución. Dawkins, en su libro *The Selfish Gene*, hace justicia a tales ideas y explica con detalle cómo "funciona" dicha estrategia en diversos casos; es difícil negar su sugerencia de que este concepto, que muestra cómo un grupo de individuos con objetivos egoístas pueden trabajar para el bien común, es el más considerable avance del pensamiento sobre la evolución desde los tiempos de Darwin. Por este motivo, y por la ingenua aceptación que todavía existe de

la idea de la selección de grupo, quiero perfilar un poco este punto parafraseando uno de los clásicos ejemplos de Maynard Smith sobre el funcionamiento de la estrategia estable de evolución, anotado por Dawkins, la escenificación de “halcones contra palomas”.

Imaginemos una población de animales de cualquier especie, con un individuo halcón o paloma en el sentido usado para denotar el comportamiento humano agresivo. Los halcones siempre pelean cuando se encuentran con un rival; las palomas pueden amenazar, pero siempre huyen si ven que el oponente ataca. Cuando un halcón se encuentra con una paloma, ninguno resulta herido porque la paloma huye. Cuando una paloma se encuentra con otra paloma, tampoco resulta ninguna herida porque, después de amenazarse mutuamente, ambas acaban huyendo. Ahora bien, cuando un halcón se encuentra con otro halcón, ambos luchan hasta que uno de los dos queda herido de gravedad. Suponiendo que los conflictos entre individuos se desatan por algo con valor material —comida, o la oportunidad de emparejarse, quizá—, es posible repartir “puntos” arbitrarios por el éxito o el fracaso en la competición que entre ellos establecen. Este es un ejemplo puramente hipotético, de modo que por conveniencia las cifras pueden ser 50 por ganar, 0 por huir, –100 por ser herido de gravedad y –10 por perder el tiempo en amenazas. Los puntos representan una medición directa del éxito genético (los individuos que obtengan la máxima puntuación obtienen la mayor parte de la comida y las máximas facilidades para reproducirse, por consiguiente sus genes sobreviven en la próxima generación). Los individuos cuya puntuación sea la más baja tienen menos posibilidades de propagar sus genes. La pregunta que la teoría de los juegos puede contestar es: ¿hay una estrategia estable de evolución en la escenificación “halcones contra palomas”? y, si así es, ¿cuál es el equilibrio estable entre halcones y palomas?

Lo primero que aprendemos es que una población integrada sólo por palomas o por halcones *no es* estable. Veamos las palomas. Si es toda la población de palomas, cada vez que dos

entren en conflicto se amenazarán y ambas obtendrán una puntuación de –10. Pero una huye primero, de modo que la otra obtiene 50 puntos, porque se queda con lo que estaba en disputa, y una “puntuación” neta de 40. Si cada individuo “gana” la mitad de las confrontaciones y pierde la otra mitad, la puntuación media por individuo y por confrontación es de 15 puntos, el resultado de 40 por victoria y –10 por derrota[55]. Todo se antoja muy bonito en una sociedad de palomas, y nadie sale herido, ni muere de hambre, ni fracasa en el momento de reproducirse. Pero imaginemos ahora que una mutación genética hace que aparezca un halcón entre las palomas. El halcón no pierde el tiempo amenazando, simplemente ahuyenta las palomas, con lo que obtiene 50 puntos en cada ocasión de conflicto. De esta forma, su puntuación media será de 50, muy por encima de los 15 puntos de media de las palomas. En consecuencia, los genes del halcón se extenderán rápidamente por la población, hasta que se produzca una cantidad significativa de halcones y entren en conflicto.

En el otro extremo, imaginemos una sociedad sólo de halcones. Cada vez que dos de ellos se encuentran luchan crudamente. Uno queda herido de gravedad y puntúa –100; el otro vence y puntúa 50. Pero la puntuación media es de un ínfimo –25, la media entre 50 y –100, y cualquier mutación de paloma que ocurriera, que puntuaría 0 debido a su cobardía, tendría una puntuación mejor que la de los halcones, al menos hasta que se reuniera la suficiente cantidad de palomas como para permitir una caza fácil a los halcones que quedaran.

Lógicamente, la población de evolución estable se encontraría en un lugar intermedio entre los dos extremos. Según nuestra puntuación particular, la población estable contiene cinco doceavo de palomas y siete doceavo de halcones —siete

---

[55] En una situación de este tipo en la vida real, habría un incentivo para cada paloma a fin de aumentar su tiempo de amenaza, en el intento de “hacer bajar los ojos” a sus rivales y ganar más de la mitad de las veces. Hemos excluido esta posibilidad de la escenificación para simplificarla, pero carece de relevancia a la hora de explicar la elaboración de los rituales de algunos animales.

halcones por cada cinco palomas. En el mundo real, eso equivaldría a decir que la *estrategia* estable consiste en que cada individuo se comporte como un halcón siete veces de doce y como una paloma cinco de doce. Los genes que transportan las órdenes de "sé agresivo algo más de la mitad de las veces y huye en casi la mitad de las ocasiones" son los más afortunados y se expandirán para crear una población estable siguiendo una estrategia estable. El hecho de que esto no tiene nada que ver con el bien de la especie lo confirma el éxito que alcanza esta estrategia en la sociedad de siete halcones por cinco palomas, cada individuo obtiene una puntuación media de 6,25 puntos en cada conflicto. Esta es una ventaja mucho menor que la que puede obtener cada individuo —y la especie misma considerada como un todo— en una sociedad de palomas (15 puntos por conflicto). Las *especies* marcharían mejor si todos sus miembros fueran palomas, pero esto es imposible porque tarde o temprano aparecerá un halcón por mutación, que gozará de una enorme ventaja en tanto los demás sean palomas. Al gen de la agresión que se hospeda en el halcón no le importa la especie; sólo se preocupa por la producción de réplicas de los genes del halcón y por el éxito de los cuerpos individuales en el momento de producir dichas réplicas.

Incluso un ejemplo tan sencillo suscita intrigantes especulaciones sobre la estrategia estable de evolución aplicada a los humanos. ¿Transportamos genes "halcón" que son perjudiciales para la especie entera de la misma forma? ¿Es posible que el relativamente reciente desarrollo evolutivo de la inteligencia nos dé la ocasión de dejar aparte los cálculos y empezar a actuar de acuerdo con el bien de la especie, en vez de hacerlo con el bien individual, produciendo también beneficios para los individuos, igual que en una sociedad de palomas? Estas son preguntas que hemos de ver a la luz de los modernos conocimientos sobre la evolución, pero que deben esperar un poco más, hasta que haya cubierto la historia de esa evolución desde el Cámbrico, aunque sea superficialmente. Antes de ello, quiero ofrecer un par de breves ejemplos sobre el funcionamiento de la estrategia egoísta.

ESTRATEGIAS EGOÍSTAS

En primer lugar, los halcones y las palomas se han ido acercando hasta la fecha. Quizá, hace mucho tiempo, hubo especies que eran similares en tamaño, forma y aptitud para la lucha pero que diferían en su comportamiento, de manera que algo parecido a la representación entre halcones y palomas pudo haber existido en la realidad. Hoy, por supuesto, los conflictos extremados hasta el punto de una herida severa tienden a suceder sólo entre especies, de modo que el esquema se complica algo más, pero no se hace imposible. Para un antílope, un león se comporta como un "halcón" en nuestra escenificación, si bien para otro león se comporta como una "paloma". Éste es un claro ejemplo de la instrucción "a veces sé agresivo, otras veces no", que puede entenderse como "sé agresivo con los antílopes, pero no con otros leones", cuyo valor, en términos genéticos, se observa fácilmente en la representación de halcones y palomas. Los antílopes siempre se comportan como palomas con respecto a los leones (y cualquier mutación que no se comportara así, perdería pronto sus posibilidades de reproducir sus genes), pero pueden seguir unos esquemas de comportamiento más agresivos entre ellos, cuando las circunstancias lo justifican. Desde siembre, no obstante, a lo largo de muchas generaciones, los leones se han convertido en halcones más eficaces —fuerte dentadura, garras, etc.—, mientras que los antílopes se han convertido en palomas más competentes —piernas largas para poder huir, sentidos vigilantes para detectar leones. Tanto los antílopes como los leones, pues, comparten un antepasado común, y uno temporalmente más cercano a nosotros que el Cámbrico. Ambos han actuado con fortuna como vehículos de replicadores de genes, y ambos pueden ser estimados como triunfadores.

Un ejemplo de la vida real, de la forma en que el comportamiento que maximiza la posibilidad de supervivencia de los genes individuales aparece como si se tratara de un comportamiento diseñado para el beneficio de la especie, lo obtenemos de los estudios sobre la cantidad de huevos que depositan los

pájaros. La prueba más poderosa que los partidarios de la idea de selección de grupo fueron capaces de conseguir consistió en el modo en que muchas especies ejercen una reproducción restrictiva. Aun cuando es de esperar que un individuo egoísta produzca el máximo de descendientes posibles, para propagar el máximo de copias de genes individuales, lo cierto es que muchas especies han limitado el número de descendientes. Esto parece que se ajusta a la idea de selección de grupo, puesto que limitando la cantidad de individuos se mantiene a la población dentro de unos límites razonables, de modo que los recursos, especialmente la comida, no son superexplotados hasta el punto de provocar un descenso de la población por culpa del hacinamiento, el hambre, alguna epidemia o lo que se quiera. La clásica respuesta a este argumento procede de los estudios de los pájaros, llevados a cabo por el ornitólogo de Oxford David Lack y adaptados para libros de texto ampliamente establecidos como *Sex, Evolution, and Behavior* de Martin Daly y Margot Wilson.

Cada especie de pájaros tiende a tener una nidada de huevos característica (algunos pájaros sólo ponen dos o tres huevos, otros llegan a la docena, pero con escasas variaciones dentro de una misma especie). A primera vista, puede parecer que una pequeña cantidad de huevos no es sino una ineficiente forma de propagar genes, puesto que un pájaro que pone cuatro tiene el doble de descendencia que otro que pone dos. Entonces, ¿por qué algunas especies ponen tan pocos huevos? No es porque biológicamente sean incapaces de poner más, ya que, cuando menos, algunas especies son capaces de seguir poniendo más a medida que se retiran del nido los ya puestos; un pájaro que suele poner tres o cuatro huevos puede ser persuadido de poner diez o doce, pero sólo tres o cuatro cada vez. De todos modos, no es menester pensar mucho para comprender que debe existir un punto en el crecimiento de la descendencia que se haga insuperable. Después de todo, el pájaro padre debe alimentar a sus crías mientras estén en el nido, y debe haber una cantidad límite de provisión de comida durante un día para los pájaros de una misma especie. No es verdad que más signifique mejor

una vez se ha alcanzado el máximo de hijos que pueden alimentarse adecuadamente. Por tanto, un pájaro que transporta un gen que le permite producir muchos huevos tal vez se encuentre en desventaja. Al intentar alimentar a su extensa prole, la madre quizá no sólo la dejará morir de hambre, sino que se expondrá ella misma a morir, con lo cual sus genes no se reproducirán. En el otro extremo de la escala, un pájaro que tiene menos descendencia de la que podría alimentar adecuadamente, disfruta de más posibilidades de sobrevivir, aunque de una forma muy limitada. El gen que determina el tamaño de los huevos y se propaga por la población será el que disponga el número máximo de crías que puede ser alimentado por cada madre de esa especie durante un año.

Estas ideas han nacido de la observación del comportamiento de los pájaros en el mundo real. Debido a cierta variación en las poblaciones, los ornitólogos pueden estudiar el éxito, en términos de reproducción, de los individuos de una especie que tienen diferente número de descendientes. Como media, las observaciones muestran que la mayoría de los que sobreviven y llegan a hacerse adultos provienen de los nidos donde ha habido nueve o diez crías. La supervivencia de un gen —en rigor, un “alelo”— que ocasionalmente produce un mayor número de huevos se explica porque en un buen año, con más comida disponible, hay más sobrevivientes por nido en aquellos nidos en que no es usual que se ponga un elevado número de huevos. Esto muestra, en miniatura, las fuerzas de la evolución en pleno funcionamiento, debido a las que la presencia de variación en las especies permite a éstas “adaptarse” a condiciones levemente distintas. Si las condiciones cambian de manera permanente y el proceso se repitiera a lo largo de mil generaciones, los genes que una vez fueron minoritarios serían ahora los comunes y las especies sufrirían una transformación. Mediante su conducta egoísta en aras de asegurar sus propios genes, el individuo no se preocupa por la supervivencia de la especie, sino por la supervivencia de la mejor modificación de la especie, la más apropiada para cada circunstancia concreta.

El ejemplo de lo importante que resulta la inversión de los padres en la cría de los hijos indica cómo, a través de la operación de los genes egoístas, se ha originado el que hoy, en la generalidad de los casos, sean necesarios *dos* sexos en la reproducción sexual sobre la Tierra.

ESTRATEGIAS SEXUALES

Acostumbrados a considerar "normal" todo lo que nos rodea, nos parecerá extraña la reproducción sexual sin sexos. Sin embargo, no hay ninguna necesidad de que existan dos tipos *diferentes* de células sexuales en el intercambio de cromosomas; con toda seguridad los primeros organismos unicelulares que se beneficiaron de la reproducción sexual eran indiscernibles los unos de los otros. La reproducción sexual llegó antes de que el sexo pudiera desarrollarse. Y a pesar de que nunca conseguiremos estar seguros de cómo evolucionó, hay una explicación muy plausible de lo que pudo haber ocurrido.

De entre las eucariotas unicelulares que empezaron a reproducirse no por medio de su división en dos, sino por medio del intercambio de material genético mezclado en dos células, cada una de ellas partida, luego, en dos, debió de haber una gran variedad de tamaños. Cualquier célula podía emparejarse con cualquier otra, pero el éxito de cada célula en el momento de la reproducción se vería afectado por el tamaño de la combinación resultante; las células mayores estarían en ventaja por disponer de una mayor provisión de material para su división en nuevas "generaciones" de células menores, las suficientes para sobrevivir. De lo cual se desprende que la selección natural puede, a lo largo de millones de generaciones, producir un cambio en las características de la "especie" que aumente su tamaño. Pero existe un efecto que incide en las circunstancias de las primitivas eucariotas que flotan libremente en el océano. La reproducción sexual sólo tendrá lugar si dos células se unen, de modo que una célula con más movilidad será capaz de nadar mejor y, por tanto, disfrutará de más posibilidades de encontrarse con otras células y reproducirse, con lo que propagaría

sus genes para la mejora de la movilidad. En esencia, más movilidad quiere decir más pequeña. En consecuencia, dos clases de células cumplirán mejor la función de reproducirse una vez inventada la reproducción sexual: las grandes células, con abundante material orgánico, y las pequeñas, que pueden nadar con rapidez en busca de pareja. Para cada célula pequeña sería particularmente importante combinarse con una célula mayor, a fin de compensar su reducida masa, con lo cual la evolución pronto seleccionaría las células menores. En cambio, las grandes todavía preferirían la unión con otras también grandes, unión dificultada a medida que aumentaran más y más de tamaño y, por otro lado, a medida que las pequeñas fueran cada vez menores y más efectivas en la búsqueda de compañeras grandes. De manera que son dos células las que necesitan desarrollarse a partir de una población inicial con una distribución azarosa de los tamaños celulares. Este modelo ha permanecido inalterable hasta nuestros días, siendo las células grandes (óvulos) características de las hembras de todas las especies y las pequeñas (espermatozoides) características de los machos. Independientemente del tamaño del cuerpo, los machos producen espermatozoides, que son células mucho más pequeñas que los óvulos producidos por las hembras de la misma especie, y ésta es la mejor y más sencilla definición de los dos sexos.

La casi idéntica cantidad de miembros de cada sexo en toda especie sigue de una manera automática una estrategia de evolución estable. Centrándonos ya en animales grandes y multicelulares, cada individuo debe encontrar un compañero del sexo opuesto al objeto de reproducirse. Si hay más hembras que machos, por ejemplo, los machos entonces tienen ventaja, porque disponen de más posibilidades de encontrar un compañero y pasar material genético, incluido el “alelo” masculino[56]. La proporción de machos, pues, se incrementará. De modo similar, si hay más machos, serán entonces las hembras quienes

[56] El “gen” del sexo es, de hecho, un cromosoma entero, lo que indica su importancia en la evolución.

encontrarán más fácilmente un compañero para poder reproducirse, y por tanto el "alelo" femenino se extenderá en el campo genético. Siempre que el balance entre los sexos se aparte del equilibrio, la presión evolutiva actuará para restablecerlo. Así, el éxito de la reproducción sexual, conforme mezcla material genético asegurando la suficiente variabilidad en la población mediante la adaptación a ambientes cambiantes, nos conduce directamente a la evolución de los dos sexos y al modelo según el cual hay poco más o menos igual número de machos que de hembras. La mayor "inversión" de la madre en el óvulo nos conduce también a la evolución de la mayoría de las características por las que distinguimos los sexos, incluyendo la protección maternal.

Un animal macho puede producir una enorme cantidad de espermatozoides, y se "supone" que la mayor parte de ellos morirán sin haber encontrado un óvulo para producir un hijo. Una hembra, por su parte, produce menos pero mayores células, cada una de las cuales requiere una "inversión" en la forma de alimento —el utilizado en su producción—, de modo que cada célula resulta más costosa para ella que un espermatozoide para el macho. A partir de esta pequeña diferencia inicial, la selección, a través de muchas generaciones, ha ensanchado la brecha, en la medida en que la diferencia entre ambas células tuvo lugar. Cuanto más "invierta" la madre en la supervivencia de sus hijos, más "maternal" y afortunada será, en términos de reproducción. Y cuanto mayor sea el número de hembras a las que un macho aporte sus espermatozoides, siempre que cada una de ellas preste atención maternal a los hijos que resulten, más afortunado será en los mismos términos. No es ninguna coincidencia que muchas especies animales funcionen con arreglo al principio del harén, que supone un macho dominante que dirige a tantas hembras como pueda mantener en competición con otros machos. Esta clase de desarrollo evolutivo básico puede tener relevancia en el comportamiento humano; pero nosotros tratamos de ser "civilizados" y de comportamos

de acuerdo con unas reglas diferentes a las que supone la estrategia de evolución estable[57].

LA EVOLUCIÓN DE LA DIVERSIDAD

En suma, la evolución es producto del funcionamiento de la reproducción sexual, y ello ha sido así durante cientos de millones de años. En la historia de la evolución de los organismos multicelulares, y en particular de los orígenes humanos, la reproducción sexual es lo único que nos interesa ahora. Este método, combinado con la diversidad de genes alelos disponibles entre toda la población de una especie, es el que ha hecho posible la evolución a esa velocidad desde el cámbrico, con nuevas "manos" de material genético constantemente repartidas a partir del "juego de cartas" barajadas, y con pequeñas mutaciones que ocurren en la población, quizás a un nivel bajo, hasta que algunos cambios en el mundo exterior les den un alto grado de supervivencia y les permitan extenderse al mismo tiempo que otros desaparecen. No debe olvidarse que un animal de reproducción sexual, como es el caso del hombre, tiene dos juegos de cromosomas, uno de cada progenitor, y que cada específico punto de un cromosoma será un gen específico,

[57] De hecho, tal como señala Dawkins, la mejor estrategia para *cada* sexo es la de abandonar a los hijos, pensando que el otro progenitor se ocupará de ellos. Puesto que la fertilización del óvulo tiene lugar en el interior del cuerpo del animal hembra, es bastante difícil para ella poner en práctica dicha estrategia, y es el animal macho el que tiene más posibilidades de escaparse con algún otro. Este método de reproducción es consecuencia del hecho de vivir sobre tierra seca, y algunos peces lo demuestran bajo ciertas condiciones. En el mar, la fertilización se produce fuera del cuerpo de las hembras, las cuales ponen los huevos antes de que el macho libere los espermatozoides. Si el macho los libera antes del momento preciso, se perderán por el agua; para evitarlo tiene que esperar hasta que los huevos estén puestos. Para cuando esto sucede, la hembra puede haberse ido ya, dejando al macho al cuidado de los huevos fertilizados. Esto es lo que ocurre al menos en una especie, y pase lo que pase, el progenitor al que se haya abandonado con la cría no podrá desentenderse de ella, o, de hacerlo, habrá fallado todo el proceso de reproducción.

acaso el que decida el color de los ojos. Si cada par de cromosomas tiene el mismo gen en un punto determinado, es homogéneo. Si los tiene diferentes, es heterogéneo. Muchos de los genes son, en realidad, homogéneos, en los que los rasgos heredados de cada progenitor describen gran parte de la estructura (dos piernas, un corazón que funciona de tal manera, un hígado construido según tal plan, etc.). Sólo el 6,7% es heterogéneo, en el caso del hombre, es decir, 6.700 de entre un total de 100.000 genes. Con los cromosomas emparejados, eso significa decir que hay en teoría $2^{6.700}$ diferentes formas de construir un ser humano. No es en absoluto un número astronómico: corresponde a algo más de $10^{2.000}$, y si tenemos en cuenta que el Universo contuvo la suficiente materia como para cerrarse todo él, en forma de átomos de hidrógeno, resulta que el número de átomos en el Universo entero sería de 10^{80}, cifra completamente nimia e insignificante comparada con la de $10^{2.000}$. Las diferencias entre dos personas genéticamente idénticas, a menos que se trate de gemelos producidos por la división de un óvulo fertilizado, están en una relación de $10^{2.000}$ a 1, y ésa es la variabilidad que proporciona el campo de variaciones del que la evolución selecciona la más apta de cada generación. Si el clima cambia, o un nuevo depredador aparece en escena, es improbable que todos los individuos de la población desaparezcan, y los supervivientes deberán ser, por definición, los mejor capacitados para sobrevivir y reproducirse en una situación de cambio.

La evolución sigue adelante todo el tiempo, de la misma forma que nuevas permutaciones de “alelos” se mezclan con los genes disponibles y las combinaciones más eficientes sobreviven con una mayor efectividad. Esta gradual adaptación de las especies a su (quizá cambiante) medio ambiente se llama evolución “filática”. Las especies pueden igualmente diversificarse, escindiéndose en dos o más especies, si poblaciones distintas se ven separadas por una barrera física, como una nueva cordillera de montañas, por ejemplo, o la fragmentación de un supercontinente en varios continentes más pequeños.

Cuando eso ocurre, cada rama de la familia continuará con su evolución "filática". Es posible que, antes de que las relaciones distantes les cambien demasiado, las poblaciones separadas vuelvan a juntarse, cruzarse, y hacerse indiscernibles otra vez. O quizá vivan alejados durante tanto tiempo, y cambien tanto, que ya no puedan nunca más cruzarse, aunque volvieran a relacionarse. Así es como surgen las nuevas especies, y el proceso recibe el nombre de "especiación". Volviendo atrás, a la noche de los tiempos del Precámbrico, cualquier ente vivo sobre la Tierra ha sido creado por especiación repetida y evolución filática, empezando por unas pocas —acaso sólo una— células vivientes originales. Los organismos multicelulares, no obstante, han evolucionado de forma separada e independiente a partir de diferentes e inmediatos antecesores unicelulares.

Cuando rastreamos los antecedentes del hombre desde las células primitivas hasta el momento actual, la historia, inevitablemente, se desdobla como si la evolución trabajara para lograr un producto específico acabado que fuera mejor que todos los anteriores. Para muchos, la humanidad todavía se muestra como el "punto final de la evolución", una "creación" superior comparada con otros productos evolutivos. La evolución, sin embargo, no ha terminado, y no hay modo de asegurar que seamos nosotros el punto final; tampoco somos superiores, ni biológica ni evolutivamente, a otras especies; tan sólo diferentes. La inteligencia, en verdad, es una significativa, interesante y capital diferencia. Pero parece bastante factible que la inteligencia contribuya al fin de la raza humana, mediante las guerras, en poco tiempo. Si esto ocurre, lejos de representar la cima de la evolución, estaremos representando un callejón sin salida, menos afortunado en la preservación y reproducción de genes que los dinosaurios, los trilobites del Cámbrico o las procariotas que han sobrevivido, como tipos, desde el Precámbrico hasta nuestros días. Es importante no olvidar la diversidad de la vida sobre la Tierra, ni que cada especiación que ha supuesto un paso adelante en la evolución hacia la aparición del hombre moderno ha provocado la escisión, por lo menos, de una especie.

Como seres humanos, estamos especialmente interesados en los orígenes del hombre, y en un libro como éste no hay espacio para seguir cada rama del árbol de la especiación y diversificación. No obstante, existen.

De modo que, con todo ello presente, podemos abordar la historia de los orígenes humanos desde las primitivas células hasta la llegada de prehumanos reconocibles. No seguimos la historia de las procariotas, ya que nuestros antepasados descienden de la rama de las eucariotas; no seguimos al detalle la diversificación de las plantas, puesto que somos animales; nos importa menos la vida en el mar que sobre tierra, porque vivimos sobre ésta; y nos interesan sólo marginalmente los animales invertebrados, en cuanto que nosotros tenemos espina dorsal y un esqueleto óseo como armadura para nuestras partes más vulnerables. Frente a todo ello, no obstante, está la existencia de un total de 2 millones de especies multicelulares en el mundo actual, muchas de las cuales han ido apareciendo y desapareciendo a lo largo del tiempo geológico desde el Cámbrico. ¡La vida es muy compleja!

Es fácil de comprender, en principio, por qué los organismos multicelulares son tan afortunados en términos evolutivos. Debido a que hay muchas células que trabajan juntas, la muerte de una o incluso de un buen número de ellas no tiene ninguna importancia para el organismo como tal, ya que las células individuales pueden reemplazarse.

Esta característica ofrece al organismo la posibilidad de vivir más y de reproducirse más, utilizando células que, protegidas por el resto del organismo, pueden especializarse en la reproducción y en la función de mezcla y réplica de cromosomas. Lo demás —fortaleza, afilada dentadura, buena vista e inteligencia— ha evolucionado porque ayuda al organismo a sobrevivir y reproducirse. Todos los organismos multicelulares, en la actualidad, son miembros de uno de los tres “reinos”: las *plantas*, que fabrican materia orgánica viviente mediante el uso de la energía de la luz solar en la fotosíntesis; los *hongos*, simplemente (aunque inadecuadamente) definidos como plantas que, más que servirse de la fotosíntesis, viven a expensas de

restos orgánicos; y los *animales*, que se alimentan de otros productos orgánicos y se extienden por todas partes[58].

Se han descubierto madrigueras fosilizadas en rocas de una antigüedad de 700 millones de años, lo que nos enseña que la vida animal ya estaba bien asentada a finales del Precámbrico[59]. En Australia se han hallado, asimismo, restos de medusas del período de transición entre el Precámbrico y el Cámbrico, y las conchas de invertebrados tales como los trilobites dejaron sus huellas a través del Cámbrico, delimitando ellos mismos la transición. Hacia el final del Cámbrico, hace unos 500 millones de años, Pangea I se fragmentó en varios continentes que crearon una diversidad de condiciones ambientales en las aguas someras de sus costas, lo cual originó una gran diversificación de especies. Dentro de esa diversidad de vida se encontraban nuestros directos antecesores, los primeros peces vertebrados. Desafortunadamente, sin embargo, los registros fósiles no se depositaron con la conveniencia que los investigadores humanos hubieran deseado, sino con arreglo al oficio del viento, las olas y el clima. Y una de las más enojosas lagunas en los restos, desde el punto de vista humano, radica

---

[58] Algunos animales no "se extienden por todas partes" en un sentido estricto. Las esponjas son en realidad colonias de pequeños animales que se desenvuelven juntos, y representan una clase de cooperación multicelular inventada por los eucariotas, separada del invento de la cooperación multicelular que nos ha llevado hacia el resto de la vida animal. No me extenderé más sobre este tema ya que me he propuesto seguir el rastro de los orígenes humanos.

[59] Mientras este capítulo estaba en prensa, William Schopf y sus colegas de la Universidad de California, Los Angeles, anunciaron la identificación de registros microfósiles de cinco tipos diferentes de organismos, todos ellos parecidos a las modernas bacterias, en rocas de Australia de 3.560.000 años de antigüedad. Éstos son los más antiguos registros fósiles. Aunque ello no hace cambiar nuestros conocimientos del Cámbrico, ni la evolución de la vida terrestre, merece la pena mencionar la existencia de tan antiguas formas de vida. Y los que postulan que la vida se originó en el espacio y luego fue trasladada a la Tierra no han tardado en apuntar la dificultad que supone el que unos organismos tan avanzados bioquímicamente pudieran evolucionar de manera improvisada en los primeros 1.000 millones de años desde la formación de la Tierra. Los microfósiles que se han identificado confirman la existencia de estromatolitos en esa zona, tal como se dijo en el capítulo 6.

precisamente aquí. El Ordoviciense se distingue por ser un período con un enorme desarrollo en la vida marina, y por la abundancia de fósiles. Pero aparte de contados fragmentos de huesos y de láminas de armaduras escamosas, no se ha encontrado ninguna evidencia de vida vertebrada en dicho período. Los fragmentos hallados son muy semejantes a registros posteriores que los paleontólogos están seguros de que son pequeños peces vertebrados que nadaron por los mares hace unos 450 millones de años. Pero la laguna en los registros fósiles ha hecho que fuera imposible identificar a los directos antecesores invertebrados de esos vertebrados, que carecían de mandíbulas y que se denominan ostracodermos.

A pesar de que la especulación sobre esos inmediatos antecesores no representa un verdadero sustituto de la evidencia fósil, hay una buena explicación del porqué de la no conservación de restos fósiles de los primeros vertebrados. Muchos vertebrados, actualmente, tienen una espina dorsal ósea, que cumple la doble función de proteger los importantes nervios de su interior y servir de soporte al cuerpo y la cabeza. Algunas especies, en especial los tiburones, tienen espinas de cartílagos blandos en vez de huesos duros, lo cual no es una desventaja para el tiburón, que flota en el mar. Da la impresión de que los primeros peces vertebrados "ingeniaron" en primer lugar las vértebras blandas y cartilaginosas, y que las vértebras óseas y duras resultaron de un desarrollo evolutivo posterior[60].

---

[60] Los tiburones, dicho sea de paso, se cuentan entre los grandes éxitos de la evolución. Nunca han dominado su medio, pero han estado presentes desde el Devónico hasta ahora con tan sólo ligeras modificaciones. La única parte dura del esqueleto del tiburón, por ejemplo, es la dentadura. Nunca han sufrido presiones evolutivas para desarrollar un esqueleto duro porque pueden sobrevivir perfectamente sin él, y así lo han hecho durante unos 400 millones de años.

DE PEZ A ANFIBIO

Sean cuales fueren sus orígenes directos, no hay especulación posible sobre el éxito de los peces óseos una vez que aparecieron. Hay hoy más especies de peces óseos que de todos los demás vertebrados juntos (otro recordatorio de que nuestra visión de la "historia del éxito" humano es resultado de un muy singular punto de vista). Pero las especies modernas se diferencian de esos primitivos ostracodermos en dos importantes aspectos.

Además de no tener mandíbulas, esos primitivos peces óseos carecían de ese par de aletas que hacen de los peces modernos tan buenos nadadores. Todavía existen unos pocos descendientes de tales peces, pero las ventajas de una boca con afilados dientes y unas aletas para nadar son tantas, en términos de evolución, que esos ostracodermos se vieron casi enteramente reemplazados, durante el Devónico, por los placodermos, con mejores mecanismos de alimentación, que, por supuesto, implican más larga vida y más posibilidades de reproducirse. La evolución de los peces mandibulados durante el Devónico siguió dos líneas principales, una que condujo hasta la diversidad de peces óseos que conocemos hoy día, y la otra que lo hizo hasta los tiburones cartilaginosos y similares, como las rayas, cuya flexibilidad les viene dada por sus esqueletos de cartílago. La siguiente diversificación evolutiva, no obstante, nos lleva al punto donde se abandona la línea de evolución de los peces óseos para pasar a la historia de la continua adaptación al hábitat acuoso que producirá la extensa variedad de peces actuales. En cambio, nos inclinaremos por las aventuras de las especies que se separaron del grupo principal y que, desde entonces, han tomado un extraño y, para nosotros, más interesante camino.

Casi todos los peces modernos descienden de un tipo de pez mandibulado conocido como de aletas radiales, que tiene las aletas aerodinámicas de peces tales como el bacalao o el salmón. El otro tipo principal de peces con mandíbulas, de finales

del Silúrico y principios del Devónico, es el de aletas pedunculadas, el cual poseía partes de material óseo que bordeaba su esqueleto y se extendía hasta las aletas. Éstas tal vez fueron útiles para arrastrarse en los fondos marinos, pero las aletas radiales demostraron su superioridad para la natación; las aletas pendulares fueron un fracaso en los peces normales, hasta el extremo de que hoy sobreviven sólo en determinados casos. Sin embargo, esas aletas de lóbulos óseos resultaron determinantes a la hora de permitir nuevas evoluciones: el desarrollo de extremidades que facultaron a algunos de los descendientes de los primitivos peces de aletas pedunculadas para salir del agua y tratar de emprender una nueva vida sobre la tierra. No sólo descendemos de los peces, sino que lo hacemos de unos peces desafortunados[61].

Los animales no podían dar el siguiente paso, trasladarse a vivir en tierra firme, hasta que no hubiera en ésta algo que comer. En otras palabras, las plantas fueron las primeras en colonizar la tierra. La mejor prueba de ello es que no hubo una colonización significativa de la tierra por parte de las plantas hasta mediado el Paleozoico, al final del Silúrico. Las plantas, evidentemente, estaban sujetas a las mismas presiones evolutivas que los animales, y no es ninguna coincidencia que se diversificaran y extendieran al mismo tiempo que lo hacían los animales. Ambos eran el producto multicelular de los primitivos organismos unicelulares; ambos dependían para su respiración del aumento del nivel de oxígeno en el aire; y ambos se vieron afectados por el flujo y reflujo de los hielos y por la fragmentación y por la reorganización de los continentes. La

[61] Lo cual no es tan sorprendente, puesto que el éxito, por lo que hace referencia a nuestros genes, significa réplica *perfecta*, y los más afortunados peces devónicos tienen descendientes nadando por los mares actuales. Las aletas pedunculadas, que compitieron con las de raya, fueron eliminadas en la competición; las rarezas que pasaban todo el tiempo arrastrándose por los fondos menos profundos de las costas, ríos o lagunas no entraron en competición y sobrevivieron: se reprodujeron para transmitir sus genes de "arrastrarse por el barro de las aguas someras", de modo que entonces las aletas pedunculadas constituyeron una ventaja para la selección, permitiendo a los peces obtener más comida y reproducirse con más eficacia.

combinación de ciertos factores desde el Silúrico en adelante hizo que las plantas se desplazaran con rapidez hacia la tierra, y los restos fósiles demuestran que hacia la mitad del Devónico ya existían bosques reales, con plantas de una altura de diez metros rodeadas por una espesa maleza de plantas menores. El Carbonífero conoció una más extraordinaria explosión de la vida vegetal, en las épocas calientes, con clima húmedo sobre la mayor parte de la superficie de la Tierra. El nombre de Carbonífero se debe a los grandes yacimientos de carbón depositados por aquel tiempo y que todavía ahora se aprovechan; el carbón se produjo a partir de los restos de gigantescos árboles, que, por aquel entonces, se estaban diversificando en distintas formas. Enormes cantidades de detritos quedaron depositadas durante este período, detritos enterrados y eventualmente transformados en carbón por presión geológica. Ello pudo haber eliminado buena parte del dióxido de carbono de la atmósfera, liberando oxígeno y encerrando el carbono en depósitos carboníferos; un cambio tal quizás influyó en el posterior desarrollo de la vida, reduciendo levemente la temperatura al mismo tiempo que se debilitaba el efecto de invernadero y, con mucha probabilidad, enriqueciendo el oxígeno de la atmósfera, con lo cual preparaba el terreno para que los animales con respiración de oxígeno pudieran aparecer sobre la tierra. Quizás el mayor problema de la incidencia humana sobre el medio ambiente actual sea la rapidez con que quemamos la energía fósil, depositada mucho tiempo atrás en forma de yacimientos de carbón, y devolvemos el dióxido de carbono de nuevo a la atmósfera. Hay serias posibilidades de que ello pueda conducimos a un desagradable calentamiento global, con efectos nocivos para la vida humana; en términos generales, quizás estemos dando marcha atrás, en cierto aspecto, hacia el Carbonífero. El hecho de que la vida sobrevivió tan felizmente durante y después del Carbonífero más bien contradice a esos alarmistas que vaticinan un *incontrolado* efecto de invernadero como resultado de la quema de petróleo que convertirá la Tierra en un desierto. Si bien las condiciones han cambiado mucho a lo largo de estos

últimos 400 años, no hay razón alguna para pensar que la cantidad de dióxido de carbono que demostró ser tan adecuada para la vida entonces no sería tolerada ahora, y tampoco es que estemos introduciendo más dióxido de carbono en la atmósfera, sino que lo que ahora hacemos es restablecer lo que tiempo atrás quitó la vida de las plantas de los períodos de formación del carbón.

Al tiempo que la vida de las plantas se trasladaba hacia la tierra, primero en lugares próximos al agua, luego mediante el desarrollo de técnicas para sobrevivir lejos del agua (técnicas tales como sistemas de raíces para buscar agua bajo el suelo y coberturas de la superficie de las plantas para evitar la evaporación del agua), los animales seguían el ejemplo. Los gusanos se abrieron camino por el barro y los "ciempiés" fueron de los primeros en llegar, puesto que sus cuerpos no necesitan demasiada adaptación —aparte, claro está, de "aprender" a respirar el oxígeno del aire en vez del que hay en el agua— a una forma de vida afirmada en la Tierra, además de que los restos orgánicos de plantas, o las mismas plantas vivas, suministran su alimento. La reproducción encontró nuevas dificultades en la tierra, pero, una vez más, nada que no pudiera solucionarse con el paso de millones de años y millones de generaciones para que la evolución derivara en la diversificación y especialización. Algunas de las relaciones entre esas trepadoras y estos reptantes todavía persisten, y sus descendientes más conocidos son los insectos, que empezaron a aparecer cuando los descendientes especializados que son los peces de aleta pedunculada se desplazaron hacia tierra, en la cual, para entonces, ya existía, al menos en las regiones más húmedas, una considerable cantidad de orugas, así como de plantas, con las que alimentarse. Esta nueva presión selectiva sobre los reptantes pudo ser una de las razones por las cuales se convirtieron en voladores. De todas formas, aunque sea un sólido argumento que los insectos han sido más afortunados que los vertebrados en la conquista de los más diversos nichos ecológicos, nosotros somos vertebrados y la historia de los orígenes humanos está más en cone-

xión con esos primeros animales vertebrados que con la historia de los insectos, salvo en los casos en que los insectos representen una valiosa fuente de alimentación.

Así es que podemos volver de nuevo a la historia de la evolución de nuestros directos antecesores, reanudándola desde finales del Devónico, Hace unos 350 millones de años. Por aquel tiempo, algunos peces con aletas pedunculadas ya habían aprendido a respirar aire, como una fuente extra de oxígeno, y también a utilizar sus aletas para moverse por las aguas someras. La selección natural favoreció que la descendencia tuviera unos pulmones más eficaces y mejores "piernas", casi con toda seguridad debido a las desaprovechadas fuentes de alimentación existentes alrededor de las aguas en que vivían. A diferencia de los antecesores de los primeros peces vertebrados, sí tenemos especies fósiles de lo que al parecer es el antecesor directo de esa línea evolutiva, de la cual provienen todos los vertebrados terrestres actuales. Indudablemente, una vez se estableció una línea sobre la tierra, los que llegaron después tuvieron muy pocas posibilidades de competir, de modo que ninguna otra línea de vertebrados pudo hacer la transición desde el agua hasta la tierra. Por consiguiente, el pez llamado *Eusthenopteron*, fosilizado en depósitos de hace 350 millones de años, o algo más, es uno de los claros ejemplos de un antepasado común, del cual hemos descendido al igual que el resto de vertebrados terrestres, como los elefantes, mi gato, su perro, un colibrí o un canguro de Australia.

La característica distintiva de los *Eusthenopteron* es el tubo que comunica la nariz con la boca, la única característica entre los varios candidatos a ser considerados antecesores de los anfibios, pero que igualmente se halla hoy en los vertebrados terrestres. Además, el modelo de los huesos de las aletas de los *Eusthenopteron* de aletas pedunculadas es muy similar al modelo de huesos de los vertebrados actuales; los huesos podrán ser mayores o menores, pero el mismo esquema óseo y en la misma relación se encuentra entre los vertebrados terrestres y los *Eusthenopteron.* Durante un breve período de tiempo, los descendientes inmediatos de los *Eusthenopteron* disfrutaron de

unas condiciones casi ideales, en la medida en que iban aprendiendo a moverse fuera del agua, al principio en rápidas incursiones, luego en expediciones cada vez más largas, a través de sucesivas generaciones y al tiempo que eran seleccionados los mejores. Para empezar, no había depredadores a su caza; había mucha comida en forma de gusanos, serpientes y antepasados de los insectos. Como consecuencia de ello, los anfibios experimentaron una espectacular di versificación, por la que algunas líneas pasaron a ser depredadores y a alimentarse de sus parientes. Tuvieron que volver de vez en cuando al agua, algunos para mantener su piel húmeda, y todos para reproducirse; ésta es la característica distintiva clave de las especies de anfibios supervivientes tales como las ranas y los tritones. Pero los anfibios modernos no se parecen en nada a sus antepasados que dominaron la Tierra durante 75 millones de años, ya que alguna de dichas especies tenía una longitud de varios metros y devoraba carne fresca, como indican los registros fósiles de su afilada dentadura y sus fuertes mandíbulas.

LA ERA DE LOS DINOSAURIOS

En este momento (para dar una idea de la escala de tiempo en que han tenido lugar estos cambios evolutivos) los continentes se estaban reagrupando para formar Pangea II, con cambios generalizados del medio ambiente en muchas partes del globo. Desde el comienzo del Cámbrico hasta el Misisipiense la expansión de los anfibios representa un lapso de tiempo de unos 250 millones de años, tiempo suficiente para que se produzcan cambios principales en la geografía de la Tierra, así como en las formas de vida que en ella habitan. Con todo, el desarrollo de los anfibios —instalados ya en tierra firme, sólo volvían al agua para reproducirse, con una primera fase larvaria, como la de los renacuajos de las ranas, que nadan en el agua hasta que llegan al grado de madurez con el que aparecen las patas y los mecanismos para respirar aire, tan necesarios para la vida sobre la tierra— se produjo con sorprendente rapidez si lo compara-

mos con la edad del planeta. Desde los primeros peces vertebrados hasta la diversificación de los anfibios por toda la tierra transcurrieron solamente un par de cientos de millones de años; el origen de los vertebrados se sitúa en un momento indeterminado, dentro de la laguna de los registros fósiles, hace unos 500 millones de años. Desde entonces, el camino seguido por la evolución ha sido igual de sorprendente en algunos aspectos —el paso de anfibio a hombre en sólo 300 millones de años—, si bien algunas afortunadas y bien adaptadas especies (como los tiburones, las libélulas y las cucarachas) han permanecido sin cambios desde finales del Paleozoico.

Mientras los insectos consolidaban sus posiciones sobre la tierra, los vertebrados todavía se estaban diversificando y haciendo surgir nuevas especies. En el proceso, la continua mezcla de genes conllevó otro cambio a finales del Paleozoico, tan significativo como el que supuso el paso de pez vertebrado a anfibio. El gran inconveniente de la vida anfibia es, por supuesto, la todavía presente dependencia del agua. En primer lugar, la larva debe afrontar toda clase de peligros en la vida acuática antes de escapar y contender con otra clase de peligros en tierra. En segundo lugar, cuando llega a su forma adulta no puede disfrutar de completa libertad de movimientos sobre la tierra, toda vez que necesita el contacto con el agua. Cuando la selección natural produjo especies que desarrollaron la fertilización del óvulo dentro del cuerpo de la madre y la posibilidad de que un huevo no fuera puesto hasta que no hubiese sido cubierto con una fuerte y protectora cáscara, dichas especies se encontraron en una posición tan ventajosa con respecto a los anfibios como los primitivos anfibios lo estuvieron con relación a sus inmediatos antecesores. Estos animales “ponedores” de huevos eran (y son) los reptiles; en esencia, los huevos permitieron a las crías desarrollarse sin riesgo a través de la fase de “renacuajo” en un pequeño mundo de agua, para eclosionar sólo cuando hubieran madurado lo suficiente como para poder respirar aire y correr con sus propias patas. Los reptiles se extendieron desde sus orígenes en el Pensilvaniense, y reemplazaron a los anfibios en muchos lugares, convirtiéndose algunos

en pasto y otros en depredadores, algunos se hicieron muy grandes —del tamaño del ganado vacuno— y otros muy pequeños —del tamaño de los ratones. Al final del Pérmico, los reptiles estaban ya en situación de dominio, divididos en una gran cantidad de especies. Estaban, realmente, en buena posición para sobrevivir a los cambios que entonces sobrevenían sobre la Tierra, y también para diversificarse todavía más en las condiciones cambiantes de la siguiente era geológica, el Mesozoico.

Hacia el final del Pérmico, las cosas cambiaron espectacularmente[62]. Una razón de ello la constituye la actividad tectónica asociada con los estadios finales de la construcción de Pangea II. Se formaron las grandes cadenas montañosas y desaparecieron numerosos mares someros y regiones costeras ideales para la vida, acompañado todo ello con lluvias provocadas por la brisa marina. Hacia la mitad del Pérmico, hace unos 250 millones de años, tuvo lugar un gran período glacial que debió de prolongarse unos 20 millones de años, consecuencia directa de la geografía del tiempo y con una extensión que cubría una amplia parte de Pangea II, incluyendo lo que ahora conocemos como la India, Australia, América del Sur, la mitad sur de África y la Antártida, a través de la región del Polo Sur.

(Las marcas dejadas por el hielo de este período nos han proporcionado la primera evidencia real en apoyo de la idea de la deriva continental.) Existieron otros períodos glaciales con anterioridad, y otros procesos de formación de montañas. Pero la particular combinación de los profundos cambios en el medio ambiente de hace 200 millones de años parece que resultó excesiva para la mayoría de las especies, en especial para aquellas que habitaban en mares someros, de manera similar a como

[62] Éste, claro está, *es* el motivo por el que lo etiquetamos de final del Pérmico, y también de final de la enorme división de tiempo geológico que es la era Paleozoica. Con más precisión, debería haber dicho «entonces las cosas cambiaron espectacularmente, y como resultado los geólogos definieron el tiempo de cambio espectacular como el fin del Paleozoico». Pero ustedes ya me entienden, espero.

los cambios espectaculares asociados con la formación y fragmentación de Pangea I, hace 600 millones de años, ayudaron a dar a la vida un impulso hacia delante por medio de la creación, en primer lugar, de condiciones difíciles, que ocasionaron la muerte de muchas especies, y luego de condiciones más fáciles para la vida, lo cual permitió a los supervivientes diversificarse y ocupar nichos ecológicos deshabitados[63]. Lo mismo ocurrió al final del Paleozoico, con la diferencia de que ahora la vida ya estaba establecida con firmeza, de modo que la diversificación tuvo lugar entre animales adecuadamente adaptados a la tierra, además de entre criaturas de mares someros (y entre las plantas, naturalmente).

Es de veras alentador, desde el punto de vista de nuestra comprensión de la historia de la Tierra, que la rotura en los registros fósiles que fue tan importante para los geólogos de hace más de un siglo —tanto que la convirtieron en una frontera entre dos eras— coincida tan bien con un fenómeno tectónico de la mayor trascendencia, revelado por estudios de finales del siglo XX, como es la fragmentación de Pangea II. Al tiempo que corre desde hace 225 millones de años hasta hace 65 millones de años se le conoce como Mesozoico (“medio”), y comienza con el rompimiento de Pangea II. La masa de tierra de un supercontinente, a lo ancho del cual toda forma de vida pudo extenderse en competición y contacto directo con otras formas de vida terrestres, se rompió en continentes separados, en cada

---

[63] Algunos argumentan que la combinación de la formación de montañas, terremotos, actividad volcánica, un período glacial y la desaparición de los mares someros no basta para provocar la extinción de tantas especies al final del Paleozoico. Sugieren que alguna influencia extraterrestre pudo desempeñar un papel —un cambio en la actividad solar o la explosión de una supernova cercana, que hubiese enviado rayos cósmicos hacia la Tierra, por ejemplo. En mi opinión, al menos en lo que hace referencia a las extinciones de finales del Paleozoico, ésta resulta una visión desenfocada, y se me antoja que los cambios terrestres de aquel tiempo fueron más que suficientes para producir tal destrucción de formas de vida. No obstante, la idea de una catástrofe cósmica puede ser pertinente en otras extinciones de restos fósiles, como veremos en el siguiente capítulo.

uno de los cuales la evolución por selección natural pudo operar casi con aislamiento del resto del mundo. De manera que, una vez más, las formas de vida se diversificaron, siguiendo distintas vías en continentes diferentes, hasta que se transformaron en nuevas especies. Un grupo de reptiles estuvo especialmente afortunado en cuanto a su expansión en varios nichos ecológicos, al tiempo que se improvisaban las condiciones de vida después de las extinciones del Paleozoico tardío; fueron los dinosaurios, y la historia de la vida animal en el Mesozoico es, en esencia, la historia de los dinosaurios.

Ahora, tras la pequeña borrachera de números astronómicos que regularmente han aparecido a lo largo de este capítulo y de todo el libro, el lector puede pensar que hace 225 millones de años fue ayer, en la escala de tiempo geológico, y, en efecto, lo es, al menos en comparación con los 4.500 millones de años que tiene la historia de la Tierra. Así es que tal vez sea conveniente hacer una pausa para respirar y dar una ojeada a la situación, con la información de que al comienzo del Mesozoico el año tenía 385 días. ¿La razón? Muy sencilla: durante cientos de millones de años los giros de la Tierra se han ido decelerando gradualmente, gracias a la influencia lunar en las mareas. La fortaleza del efecto puede ser calculada, y los registros fósiles que muestran ciclos (mensuales, estacionales, etc.) de crecimiento regular confirman la precisión de los cálculos. El día solía tener bastante menos de veinticuatro horas, lo que se correspondía con el hecho de que el año tuviera más días. Nadie, al menos que yo conozca, ha incorporado satisfactoriamente tal influencia a alguna explicación de la evolución de la vida sobre la Tierra, si bien cualquiera que tenga una fértil imaginación es capaz de hacer su propia especulación sobre cómo un día de doce horas puede afectar al desarrollo de la vida de aquella época. Pero lo que aquí quiero dejar claro es que durante el Mesozoico —ayer mismo, podríamos decir— el número de días del año bajó de 385 a 371, a medida que cada día se iba alargando gracias a las persistentes fuerzas de las mareas. Tanto tiempo dominaron la vida terrestre los dinosaurios, que éstos tuvieron la oportunidad de ver cómo los días se alargaban

en un 4% y, como resultado, el número de días por año decrecía en catorce. Nuestra estancia en la Tierra está, hasta ahora, lejos de una situación parecida, y ello da otra idea del tiempo que necesita la selección natural —sobre cuántas generaciones tiene que operar— para producir cambios durante una era geológica.

El Mesozoico se subdivide en los períodos: Triásico (desde hace 225 millones de años hasta hace 180 millones), Jurásico (de 180 a 135 millones de años) y Cretácico (de 135 millones de años hasta hace 70 o 65, depende de la teoría que se siga). Fueron precisos varios millones de años, tras el desastre que delimita la frontera entre el Paleozoico y el Mesozoico, para que la vida volviera a ser tan variada como antes. Y a pesar de que la vida terrestre se vio menos afectada que la vida marina, las formas de vida que ahora se diversificaban en el mundo eran con frecuencia muy diferentes de las del Paleozoico, aun cuando a menudo ocuparan los mismos lugares en la jerarquía de la vida sobre la Tierra. Los anfibios, en particular, quedaron eliminados, tanto por la competencia de los reptiles como por los desastres naturales, y reducidos a las ranas y animales similares que hoy conocemos.

Hacia el final del Triásico, dos grupos distintos de reptiles se convirtieron en las ramas principales de la familia de los dinosaurios. Durante el Mesozoico, en diversas ocasiones, olas de extinción arrasaron la Tierra, y en cada una de esas ocasiones fueron los dinosaurios más grandes los que perecieron. Cada vez que ello sucedía, no obstante, y hasta hace 65 millones de años, los dinosaurios muertos eran reemplazados por otros, producidos por la selección natural a partir de los supervivientes. Pero son los grandes dinosaurios los que acuden a la memoria cuando se menciona la palabra; realmente la palabra significa "terrible lagarto" en griego. Un animal como el *Tyrannosaurus*, de una altura de seis metros, con larga cola y unas imponentes hileras de afilados dientes, era un terrible lagarto, sin duda; pero el nombre "dinosaurio" también define animales tranquilos del tamaño de una vaca o de una gallina.

Es como si a todos los mamíferos se les denominara “gatos feroces” puesto que todos estamos relacionados con leones y tigres. Obtendremos una idea más nítida de cómo era la vida durante el Mesozoico observando la variedad de vida animal que hay en la actualidad e imaginando un reptil por cada mamífero que vemos. Los dinosaurios no eran sólo “lagartos feroces”, sino que representaban toda la vida animal, incluyendo la del mar, donde algunas especies se convirtieron en dinosaurios equivalentes a las ballenas y los delfines modernos, que son descendientes de animales terrestres que respiraban aire.

EL TERRENO DE LOS MAMÍFEROS

Junto a los dinosaurios —casi literalmente bajo sus pies— había un grupo de animales que idearon una artimaña para reproducirse, el siguiente paso lógico (lógico si se mira atrás) en el camino marcado por los reptiles cuando desarrollaron un huevo en el cual podían tener lugar los primeros estadios en el desarrollo del animal. Algunos reptiles evolucionaron más adelante en este sentido, con el óvulo fertilizado en el interior del cuerpo de la madre en vez de ser cubierto por una fuerte cáscara y ser depositado fuera. Todo el primitivo desarrollo de los hijos tiene ahora lugar en el interior del cuerpo materno para salir al mundo exterior sólo cuando esté preparado para mantenerse sobre las cuatro patas. Este método de reproducción posee ventajas obvias, y fue este singular experimento evolutivo el que hizo aparecer los primeros mamíferos, nuestros directos antecesores, en el período Triásico. Pero difícilmente se diría que pudieran competir con los dinosaurios, más bien eran todos como ratones o musarañas (ningún rastro del “fiero gato” todavía). ¿Por qué las ventajas obvias de la reproducción de los mamíferos no les permitió gozar de mayor fortuna durante el Mesozoico? Una razón muy simple es que los dinosaurios se establecieron primero. Si una musaraña sufriera una mutación genética que la hiciera ser más fiera, podría muy bien competir con otras musarañas, pero no hubiera ido muy lejos tratando de competir directamente contra un terrible lagarto. Son precisas

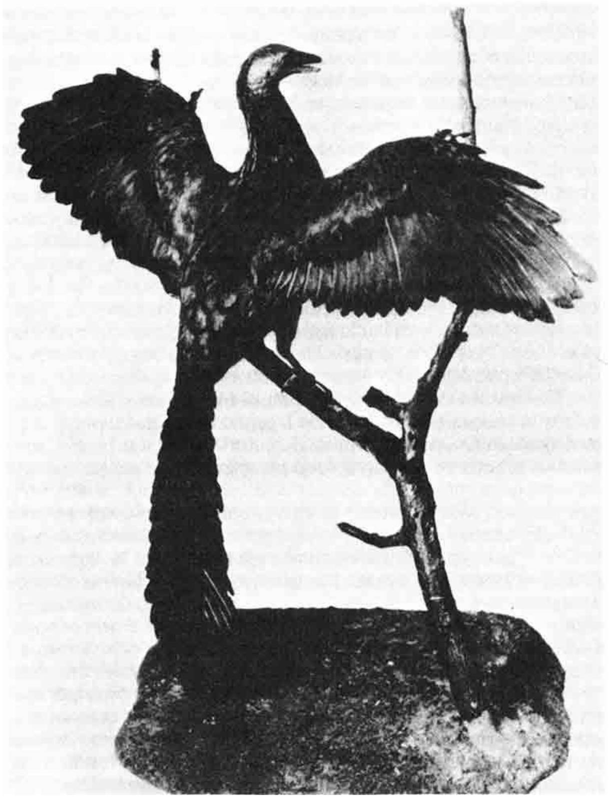
muchas generaciones para menospreciar ventajas en cuestión de tamaño y —por ejemplo— producir grandes especies a partir de una pequeña, y ello sólo puede ocurrir si no hay descomunales depredadores por los alrededores. Si los hay, entonces una gran musaraña no es mucho más notable que un sabroso bocado. De modo que las presiones de la selección durante el Mesozoico favorecieron a las musarañas pequeñas, ágiles y rápidas, con buena vista y buen oído para detectar a los depredadores.

Sin embargo, tal vez haya otras razones. Durante los últimos años ha habido un considerable debate sobre si los dinosaurios eran de sangre fría, como los actuales reptiles, o de sangre caliente, como los mamíferos[64]. Por lo que se sabe hasta ahora, algunos, probablemente muchos, y quizá todos los dinosaurios eran de sangre caliente, puesto que la estructura de los huesos de muchos restos de dinosaurios fosilizados es característica de las estructuras que se encuentran en los huesos de animales actuales de sangre caliente. Esto podría ayudar a explicar su éxito en expandirse por todos los continentes de la Tierra (excepto la Antártida) y en adaptarse incluso a climas fríos, en los que los reptiles de sangre fría se mostrarían perezosos e inactivos. Quizás incluso explique por qué los primeros mamíferos no pudieron vencer fácilmente a los dinosaurios, que podrían haber sido, si hubieran tenido sangre caliente, tan activos como los mamíferos actuales. Y sugiere que los mamíferos, más que compartir ascendientes, estaban estrechamente relacionados con algunos dinosaurios. Los de sangre caliente pudieron haber llegado primero, antes de la división de los mamíferos a partir de uno de los dos órdenes de dinosaurios. Cabe incluso especular sobre si todos los dinosaurios ponían huevos. Debido a su parecido con los terribles lagartos, es natural concluir que sí ponían huevos, y, para confirmarlo, se han encontrado huevos de dinosaurio fosilizados. Pero, ¿todos los dinosaurios ponían huevos? Muy probablemente, algunos debieron

---

[64] Véase, por ejemplo, el libro de Adrián Desmond, *The Hot-Blooded Dinosaurs* (Londres, Blond and Briggs. 1977).

de desarrollar la estratagema de los mamíferos de dar a luz a sus hijos vivos, a pesar de que quizá no siguieran todo el “invento” completo.



Esta reconstrucción muestra el aspecto que probablemente tenía el *Archaeopteryx,* antepasado de las modernas aves. En lo básico un lagarto volador —una especie de dinosaurio—, el *Archaeopteryx* poseía dientes y una larga cola articulada. Pero, como muestran los ejemplares fósiles de 150 millones de años de edad, también se hallaba provisto de plumas. *Copyright del British Museum (Natural History).*

El esquema de la vida animal en el Mesozoico pudo ser diferente a la imagen popularizada de lagartos descomunales en

lucha unos con otros. Los dinosaurios debieron de ser, de hecho, muy similares en cuanto a la diversidad de animales de sangre caliente que nos rodea, viviendo la clase de vida que hoy viven los elefantes, tigres, leones, vacas, ciervos, etc. Los mamíferos del Mesozoico, por otro lado, ocuparían los nichos ecológicos de los "animales pequeños", lo que constituiría un elemento significativo en la dieta de, al menos, algunos dinosaurios. Las extinciones que eliminaron a los dinosaurios más grandes, seguidas de la reaparición de nuevas especies grandes surgidas de los dinosaurios más pequeños, continuaron hasta que se cernió una extinción tan dramática que incluso los más pequeños desaparecieron. Aun así, algunos animales menores, los mamíferos, lograron sobrevivir y expandirse a continuación por todo el planeta, tal como antes había sucedido. Sólo que, en esta ocasión, los animales grandes eran, también, mamíferos. En este esquema, el mundo actual resulta muy semejante al de los dinosaurios, aunque ahora algunos mamíferos se hayan convertido en "fieros gatos", en sustitución de los extintos "terribles lagartos".

Pero los dinosaurios no han desaparecido de manera radical. Un grupo de dinosaurios ha permanecido, en sus características, hasta nuestros días. Los pájaros son descendientes directos de los dinosaurios voladores, y, con un criterio sensato, deben clasificarse en la misma familia que sus antepasados. El linaje directo de los actuales pájaros debemos buscarlo en el dinosaurio denominado *Archaeopteryx*, cuyos restos fósiles han sido encontrados en rocas del Jurásico medio, mientras que en el Mesozoico tardío estaban ya presentes varios tipos de pájaros que se diversificaban y especializaban en obtener las ventajas que les brindaba el vuelo. Algunos dejaron de volar, como el avestruz. Otros retrocedieron más todavía, volviendo al mar. El funcionamiento de la evolución por medio de la selección natural no siempre resulta lógico. Si usted se propusiera desarrollar una criatura adaptada a la natación en el océano Antártico, ¿empezaría diseñando un reptil volador? Por muy ilógico que parezca, los únicos animales que se asentaron en el conti-

nente antártico antes de la aparición del hombre fueron los pingüinos, lo cual indica que los dinosaurios debieron de extenderse incluso hasta la Antártida.

Estas rarezas ponen de manifiesto cómo el modelo evolutivo, desde la aparición de la vida, ha sido moldeado por el particular modelo de los cambios ambientales sobre la Tierra. Si la deriva continental, los reagrupamientos y fragmentaciones hubiesen sido diferentes, y si el flujo y reflujo de los hielos hubiese sido también diferente, habría del mismo modo una gran diversidad de vida, pero con escasa similitud con la que vemos en nuestro entorno, aunque vivieran en los mismos nichos ecológicos, tan escasa como la que puede haber entre un tigre y un *Tyrannosaurus*. Este modelo particular de cambios ambientales del Mesozoico deparó una primera transformación climática cuando las regiones desiertas y áridas se abrieron a vientos húmedos debido a la fragmentación de Pangea II y a la deriva de los continentes, que se iban alejando de las regiones polares. Mares de aguas someras aparecieron y desaparecieron en regiones tales como Centroeuropa, en tanto que Gondwana y Laurasia fueron entidades separadas durante el Triásico. Las fallas y la deriva continental durante el Jurásico provocaron la brecha que habría de convertirse en océano Atlántico norte, así como la separación entre Sudamérica y África, lo cual originó espectaculares levantamientos a lo largo de la costa oeste de Norteamérica, así como un mar de aguas someras que cubría buena parte del continente, mientras que los dinosaurios se propagaron por los bosques calientes y húmedos. Durante el Cretácico, a la vez que el océano Atlántico norte y el Atlántico sur se unían y extendían, el clima se moderaba por la proximidad del mar a la mayor parte de las masas de tierra; Gondwana se había dividido completamente en los continentes que conocemos hoy, y Laurasia casi dejó de existir, con sólo la angosta conexión entre Eurasia y Norteamérica en el extremo norte del océano Atlántico. A lo largo de todo el Mesozoico el clima parece que fue caliente, al menos bastante más caliente que en el Paleozoico final. Los altibajos de las diferentes especies y las desapariciones seguidas de reexpansiones, tan importantes en

los restos fósiles de los dinosaurios, pueden en muchos casos relacionarse directamente con los mencionados cambios físicos del medio ambiente terrestre. Pero, a diferencia de lo que ocurrió a finales de Paleozoico, estos factores por sí solos no bastan para justificar tan extraordinarias extinciones, cuando al final del Cretácico tantas especies de dinosaurios quedaron exterminadas, y en su lugar fueron los mamíferos los que se adaptaron a los diferentes nichos disponibles. Algo muy espectacular ocurrió hace unos 65 millones de años, algo que acabó con el reinado de los dinosaurios y frente a lo cual nuestros antecesores, fortuitamente, estaban bien preparados para beneficiarse.

VIII. ORÍGENES HUMANOS

Debemos nuestros propios orígenes a los sucesos, cualesquiera que fueran, que condujeron a la desaparición de los dinosaurios. Los mamíferos, nuestros antepasados, ya existían 100 millones de años antes de la brusca conclusión de la era de los dinosaurios, ocupando discretamente los nichos ecológicos pertenecientes a los animales pequeños y corriendo entre la maleza. Los pequeños mamíferos comían huevos de dinosaurio, cuando podían cogerlos, y los dinosaurios de tamaño medio comían pequeños mamíferos, cuando podían atraparlos. Puede decirse, en consecuencia, que los dos tipos de animales estuvieron en conflicto. Sin embargo, no existe ninguna evidencia de que los mamíferos fueran la *causa* de la desaparición de los dinosaurios. Los mamíferos no se transformaron de repente, por lo que sabemos hasta ahora, en más hábiles buscadores de huevos de dinosaurio como para poder comer tantos que éstos fueron barridos. Tampoco podemos afirmar que nuestros antecesores mamíferos fueran más inteligentes que sus contemporáneos los dinosaurios. La imagen tradicional del pesado y estúpido dinosaurio con su gran cuerpo desmesurado y su diminuto cerebro sólo cifra una parte de la historia. Muchos dinosaurios eran estúpidos; pero muchos otros eran más pequeños, ágiles y tenían un honroso tamaño cerebral en relación con el peso de su cuerpo, a la vez que probablemente eran de sangre caliente. Mientras nuestros antecesores eran todavía como musarañas escondiéndose en la maleza, al menos un grupo de dinosaurios tomó el camino —visto retrospectivamente— que los conducía a una verdadera inteligencia.

Fueron éstos los *Sauromithoides*, cuyos cerebros debieron de pesar unos cincuenta gramos, en cuerpos de unos cincuenta kilogramos, a juzgar por los fósiles. Esta relación de peso entre el cerebro y el cuerpo no queda lejos de lo que presentan hoy

los mandriles, y los *Sauromithoides* tenían un cuerpo semejante al de un pequeño canguro provisto de zarpas y de un cuello largo y flexible. Lo importante de esta estructura es que permitía la libertad de los miembros para sujetar objetos; y los *Sauromithoides* poseían manos bien desarrolladas con cuatro dedos. Estas características —andar con el cuerpo erecto, dedos capaces de asir, un cerebro razonable y buena visión— nos serán familiares en la historia de los orígenes humanos, y resulta tentadora la idea de especular sobre la futura vida inteligente en la Tierra si una catástrofe no hubiera acabado con los dinosaurios hace unos 65 millones de años. Como dijo Cari Sagan en su libro *The Dragons of Eden*, si los descendientes de los *Sauromithoides* se hubieran convertido en las criaturas inteligentes que dominaran la Tierra, entre otras cosas, se hubiera desarrollado como "normal" la aritmética en base 8, ya que tenían ocho dedos con los que contar, ¡mientras que la aritmética en base 10 hubiera parecido bastante exótica!

Pero los dinosaurios perecieron, con lo que dieron pie a los mamíferos a propagarse por los nichos que tantos millones de años habían ocupado los dinosaurios. El desastre azotó —y casi con seguridad desde fuera de la Tierra— en comparación con la anterior gran extinción[65] de especies del final del Paleozoico.

DESASTRE DESDE ARRIBA

La diferencia más importante que existe entre las extinciones del Paleozoico y las que marcaron el final del Mesozoico es que las especies exterminadas en el primer desastre fueron primordialmente las que vivían en aguas someras, mientras que al final del Mesozoico, aunque la vida marina se viera afectada, fueron los animales grandes de tierra los que desaparecieron por completo. También los dinosaurios marinos se vieron afectados. Se trataba de animales que respiraban aire que habían

[65] Opuesto a las extinciones *menores* que tuvieron lugar *durante* el Mesozoico.

vuelto al mar y nadaban por la superficie, quedando tan desprotegidos ante el desastre como sus parientes terrestres. Los verdaderos peces, los que nadaban en aguas profundas, los habitantes del fondo, apenas debieron de tener noticia de lo que acabó con los dinosaurios. Las criaturas marinas —de manera especial las que nadan en mares poco profundos alrededor de los continentes— son las especies que debieron quedar afectadas por la reconstitución de un supercontinente y por los períodos glaciales que sabemos tuvieron lugar al final del Paleozoico. A finales del Mesozoico no hubo una creación comparable de continentes, ni un período glacial importante. Considerando los registros fósiles de criaturas de aguas someras, no habría razón para pensar que hace 65 millones de años hubo una época de cambios sustanciales coincidentes con la conclusión del Mesozoico. Lo que ocurrió, sea lo que fuere, afectó irremisiblemente a todas las criaturas de la superficie terrestre, sobre todo a los grandes animales, pero incidió mucho menos en lo que estaba bajo la superficie del mar (es evidente que el desastre azotó a la Tierra desde el exterior, desde el espacio).

Hay firmes candidatos para una catástrofe tal. Dos de ellos son variaciones sobre un mismo tema, la idea de que, por una razón u otra, algún cataclismo destruyó la capa de ozono, tan importante para la protección de la vida en la superficie terrestre, a consecuencia de lo cual los grandes animales fueron víctimas de un flujo de radiaciones ultravioletas[66]. La versión más dramática de esta historia, desarrollada por el astrónomo soviético I. S. Shklovskii, responsabiliza a la explosión de una supernova relativamente cercana, lo que produjo un flujo de rayos cósmicos que barrieron la parte superior de la atmósfera, destruyendo el delicado equilibrio químico por el que se mantiene la capa de ozono. La entrada de radiaciones pudo durar sólo unos cuantos minutos: la capa de ozono se recuperará en unas cuantas décadas. Pero David Clark, del Royal Greenwich

[66] O lo fueron las plantas con que se alimentaban, por lo que murieron de hambre, cosa igualmente efectiva.

Observatory, ha señalado que la expansión del material expelido por la supernova alcanzaría la Tierra siglos después de la explosión inicial, y cubriría el Sistema Solar con partículas energéticas a lo largo de los siglos posteriores, produciendo una mayor perturbación del ambiente durante mucho tiempo, y afectando a la vida en la Tierra. Para desventura de los seguidores de esta dramática idea, parece ser que las probabilidades de que una supernova explotara cerca de la Tierra para desencadenar todos estos efectos son muy pequeñas. R. C. Whitten y sus colegas de la NASA Ames Research Center en California han calculado que una supernova lo bastante próxima como para destruir el 50% de la capa de ozono sólo se da una vez cada 2.000 millones años o más. En otras palabras, hay únicamente una posibilidad entre cien de que explotara una supernova hace 20 millones de años, y alrededor de un 3% de probabilidades de que hubiera una hace 65 millones de años. No es imposible, ¡pero sí improbable!

La otra versión de esta idea encuentra la causa de la destrucción de la capa de ozono en una fulguración de nuestro Sol, una inusual aunque no imposible explosión parecida a las fulguraciones que observamos hoy, pero 100 veces mayores. Nuestro Sol no es hoy día una estrella en calma, y nos muestra de diversas maneras su actividad; la más importante es el "ciclo de las manchas solares", con una duración aproximada de once años, en el cual se advierte un crecimiento regular de la actividad seguido de un declive hacia un estado de mínima actividad. En el punto de máxima actividad, el Sol experimenta unas explosiones que producen enormes cantidades de partículas, en su mayor parte protones, que se desplazan en el viento solar a través del espacio alcanzando algunas de ellas a la atmósfera terrestre. G. C. Reid y un equipo que trabaja en Boulder, Colorado, han calculado el efecto de los protones solares en la capa de ozono y, por ende, sobre la vida en la Tierra. Ya que uno de los efectos de los protones solares es el de estimular la producción de óxido nítrico en la atmósfera, y éste se combina con el ozono para producir dióxido de nitrógeno y "ordinarias" moléculas diatómicas de oxígeno, los protones resultan un eficaz

elemento para reducir la concentración de ozono en la estratosfera. Al menos serían eficaces para destruirlo si pudieran penetrar fácilmente en la capa de ozono. Por suerte para nosotros, hay otra capa protectora alrededor de la Tierra que nos defiende de los peores efectos: el campo magnético, que repele las partículas del viento solar cargadas eléctricamente.

Ahora bien, el campo magnético no siempre está ahí para proteger la estratosfera de las partículas cargadas. Recuérdese que el campo geomagnético se invierte de vez en cuando, y durante esas inversiones se debilita, en el mejor de los casos, por espacio de cientos o miles de años. Durante este tiempo, incluso las llamaradas solares ordinarias del tipo que hoy nos es familiar podrían reducir tanto la concentración de ozono en la estratosfera que un 15% más de rayos ultravioleta penetraría hasta nuestro suelo. Una llamarada 100 veces más fuerte de lo normal —verosímil hace unos miles de años— podría duplicar o triplicar la radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre. Este proceso parece haber influido en la vida sobre la Tierra, y pudo desempeñar un papel relevante en algunas extinciones de animales, ya que los fósiles muestran una tendencia a la extinción en períodos de inversiones geomagnéticas. Pero aún no está claro que esto fuera lo que ocurrió al final del Cretácico, cuando los dinosaurios desaparecieron[67]. Actualmente, el mejor candidato para la influencia exterior que los condujo a su ruina parece ser un impacto del exterior, el choque de un gran meteorito con nuestro planeta.

La Tierra ha sido bombardeada por meteoritos desde su formación, es más, se formó de una nube de material alrededor del Sol resultado de choques entre bloques de material, el mayor

[67] La evidencia circunstancial, sin embargo, no está del todo ausente. ¿Podría ser relevante que, de acuerdo con la mayoría de las interpretaciones de la evidencia, nuestros pequeños antepasados mamíferos ocuparan los nichos ecológicos típicos de las criaturas nocturnas? ¿Estaban los dinosaurios, activos por entonces, expuestos más directamente a los cambios en la naturaleza de las radiaciones solares que alcanzaban el suelo? No estoy convencido, especialmente porque, si algunos dinosaurios eran de sangre caliente, también podían haber sido nocturnos. ¡Pero es éste un argumento interesante!

de los cuales creció hasta convertirse en planeta. Desde hace unos 4.000 millones de años, la cantidad de material no planetario del Sistema Solar ha disminuido, a medida que los planetas han ido eliminando más y más bloques. Las abolladas superficies de la Luna, Mercurio, Marte y las lunas de Júpiter, familiares hoy por las fotografías de las sondas espaciales, muestran los encontronazos que cada planeta o luna ha recibido durante el proceso, y los cráteres son menos ostensibles en la Tierra únicamente porque han sido suavizados por la erosión y destruidos por la actividad tectónica. (En Venus, los cráteres quizás estén allí, o quizá se han desgastado, en cualquier caso la superficie se nos oculta bajo delgadas capas de nubes.) Incluso durante la presente era geológica, el Cenozoico, con una duración de sólo unos 65 a 70 millones de años, la mitad del suelo oceánico —un tercio de la superficie de todo el planeta— se ha renovado por la expansión de las dorsales oceánicas, en tanto que la vieja corteza marina se ha reciclado a través de profundas fosas. Sólo la superficie terrestre proporciona registros de sucesos con más de 150 millones de años de antigüedad, una superficie terrestre considerablemente reformada. Aun así, todavía pueden identificarse algunos de los rasgos más espectaculares, y la juventud de alguno de ellos indica que aunque el bombardeo extraterrestre haya disminuido desde los primeros tiempos de la Tierra, aún no ha concluido del todo.

El cráter Barringer de Arizona es el ejemplo clásico: 1,20 km de diámetro y 91,48 m de profundidad. Lo produjo el impacto de un meteorito que puede datarse, por las técnicas geológicas corrientes, en hace 25.000 años. Los de mayores dimensiones, como el del lago West Clearwater en Quebec (20,8 km de diámetro) y el Vredefort Ring de Sudáfrica (56 km de diámetro), muestran la característica forma circular del choque del meteorito, y son con mucha seguridad cráteres inmensos producidos por choques que tuvieron lugar hace cientos o miles de millones de años. Tales choques debieron de tener un pronunciado efecto en el ambiente, cuando menos de manera local, y los más grandes debieron tener un efecto mayor y más extendido. Al final de 1979 dos equipos de científicos llegaron,

por separado, a la conclusión de que un concreto impacto de meteorito debió de modificar el medio ambiente terrestre de forma suficiente para dar cuenta de la extinción de los dinosaurios. Desconociéndolo ambos grupos, sin embargo, la formulación original de la idea se debe a J. I. Enever, en 1966. El "error" de Enever consistió en publicar sus cálculos en la revista *Analog*, más conocida por sus cuentos de ciencia ficción. En su honor, no obstante, parece apropiado bautizar la idea como "hipótesis de Enever".



Cráter de Barringer, en Arizona, clásico ejemplo de cicatriz producida por el choque de un meteorito contra la Tierra. ¿Pudo un suceso semejante, aunque a escala mucho mayor, haber causado alteraciones medioambientales que condujeran a la extinción de los dinosaurios y al fin de la Era Mesozoica, hace unos 65 a 70 millones de años?

Enever empezó con cálculos muy simples de la energía implicada en los impactos que han producido cráteres de las características del Vredefort Ring. La ecuación empleada es una de las más elementales en física: un cuerpo de masa m que se mueve a una velocidad *u* tiene una energía cinética de $1/2\ mv^2$, y si ese cuerpo se detiene por un choque (o por cualquier otra

causa) esa energía debe ir a algún lugar. Generalmente se transforma en calor, y no es otra la razón por la que los frenos y las ruedas de un coche se calientan cuando se detiene el vehículo. El cuerpo de un meteorito ordinario puede moverse a través del Sistema Solar a una velocidad de unos 50 km/s, en relación con la Tierra, y puede tener una masa de miles de toneladas. Si un objeto de esas trazas chocara con nuestro planeta, la energía cinética convertida en calor sería equivalente a una explosión de 100.000 megatones, o más, de TNT, mayor que cualquier artefacto nuclear probado por el hombre. Pero ni siquiera esto bastaría para explicar un cráter con las características del Vredefort Ring. El impacto necesario debería de haber producido el equivalente de 10 *millones* de megatones, lo que, mediante la ecuación de la energía cinética, implica una masa de 32.000 millones de toneladas —comparable con un asteroide como el Hermes, de ninguna manera imposible en el Sistema Solar incluso hoy— acercándose a una velocidad de unos 50 km/s. La aportación especial de Enever, sin embargo, fue la de especular sobre lo que podía haber sucedido si el golpe de un meteorito de tales dimensiones se hubiera producido, no en la Tierra, como es el caso del Vredefort Ring, sino en el mar.

Quizá parezca que un impacto en el océano resulta menos espectacular que uno en tierra, ya que sería "amortiguado" por el agua. ¡Pero esto es del todo engañoso! Además del maremoto ocasionado, que asolaría las regiones costeras, la inimaginable cantidad de energía liberada en forma de calor no sólo vaporizaría el agua del mar en el punto del choque, sino que produciría un agujero de varios kilómetros de ancho en la delgada corteza del suelo oceánico. El agua que ocupara ese pozo acabaría por enfriar las rocas derretidas y se restituiría la normalidad, pero con 16.000 km^3 de agua, según los cálculos de Enever, vaporizada. Esto sería suficiente para cubrir la superficie entera de la Tierra con dos centímetros de agua de lluvia, o, si no, para proporcionar una cubierta temporal de nubes que reflejaría tanta radiación solar ¡que la Tierra entera se cubriría de una capa de nieve! Al mismo tiempo, la ascendente bola de aire recalentado subiría hacia la estratosfera, rompiendo la capa

de ozono de una manera tan efectiva como cualquier fulguración solar. Estos efectos serían, a todas luces, muy serios para la vida en la Tierra, aunque considerablemente menos para los peces. Aun cuando la idea no es más que una especulación, es cierto que impactos de esta índole pudieron tener lugar en los océanos en el curso de la historia geológica; después de todo, el mar cubre las dos terceras partes de la superficie terrestre, y el Vredefort Ring y otros cráteres muestran la evidencia de sucesos similares en tierra.

La revitalización de la idea en 1979 añadió algunos datos de relieve. Un grupo del Scottish Royal Observatory señala que es más probable que los grandes meteoritos se encuentren con la Tierra cuando el Sistema Solar pasa a través de una espiral de la galaxia y está sujeto a tropiezos con todo tipo de desechos cósmicos. Esto parece interesante debido a que recientemente, según los estándares astronómicos, hemos pasado por una de ellas. (Debería mencionar también que cerca de las espirales tiene lugar un mayor número de supernovas, hecho igualmente interesante como hipótesis alternativa de la muerte de los dinosaurios.) Otro grupo, un equipo americano dirigido por Luis Álvarez, se acercó a algo incluso más concreto, y anunció sus resultados —lo que provocó una marea publicitaria— en la reunión de 1979 de la American Association for the Advancement of Science, en San Francisco.

Como otros antes que ellos, el equipo de Álvarez citó el ejemplo del Vredefort Ring, y pensaron que un acontecimiento tal originaría un manto de polvo en la estratosfera. Este polvo se asentaría formando una delgada capa por toda la superficie de la Tierra; al principio esto ocasionaría una crisis en la vida, ya que obstruiría el paso a la luz y el calor solares necesarios y acabaría con muchas plantas y con los animales que de ellas se alimentaran. Esta versión de la idea no precisa del choque de un meteorito con el mar, y se basa en los isótopos de iridio encontrados en los estratos rocosos de una antigüedad de 65 millones de años.

Hablando con propiedad, cabe decir que el descubrimiento del iridio fue primero; el equipo de Álvarez estaba buscando

restos de polvo de meteorito, pero en principio no pensaban en la relación con los sucesos de hacía 65 millones de años. El iridio es un buen indicador de la presencia de material extraterrestre, porque existe en exigua cantidad en la corteza de la Tierra. De modo que el descubrimiento de una fina capa de iridio en el estrato que coincidía con el de la extinción de los animales hace 65 millones de años les hizo asociar de inmediato los sucesos extraterrestres con las extinciones. Por ahora sus resultados no han sido publicados detalladamente, y la prueba inmediata de la idea empezará con la búsqueda de los restos de iridio, de momento sólo identificados en estratos de Italia, en núcleos perforados en tierra y en el suelo marino[68].

PEQUEÑOS SUPERVIVIENTES: UNA NUEVA ÉPOCA

Sea cual fuere la causa, el hecho es que los dinosaurios fueron barridos por una catástrofe que sólo dejó como supervivientes a animales con menos de 40 kg de peso[69]. Nuestros pequeños antepasados estaban dentro de los límites de ese peso, y diversas ramas de mamíferos sobrevivieron a la muerte de los dinosaurios y aprovecharon las oportunidades que ésta propiciaba para propagarse y diversificarse. Incluso el término “mamífero” resulta ya demasiado general cuando se trata de trazar la historia de los orígenes humanos remontándonos a hace 65 o 70 millones de años. La definición más ajustada de “primate”, el “orden” biológico que incluye al hombre, parece más apropiada para algunos mamíferos que ya existían cuando los dinosaurios todavía dominaban la Tierra; sólo desde hace 65

---

[68] El informe del equipo de Álvarez apareció en la revista *Science* (vol. 208, p. 1095) en junio de 1980. Hacia finales de agosto otros grupos confirmaron que había restos de material extraterrestre en muestras de roca de hace 65 millones de años en Dinamarca, Nueva Zelanda y España. Existen hoy pocas dudas en tomo a la teoría del meteorito gigante para explicar el suceso que delimitó la frontera entre el Cretácico y el Terciario.

[69] Los *Sauromithoides* sobrevivieron a duras penas.

millones de años puede hablarse de la evolución de los primates más que de la evolución de los mamíferos en general[70].

Una vez más, el foco de atención de nuestra búsqueda de los orígenes humanos ha sido reajustado, y una vez más el cambio de enfoque se refleja en la escala geológica. A pesar de que la era en que vivimos, el Cenozoico, comenzó hace tan sólo 70 millones de años, gracias a los registros fósiles tenemos más evidencias minuciosas sobre los sucesos del Cenozoico que sobre los anteriores 160 millones de años o más del Mesozoico, así como la información que poseemos del Mesozoico es más minuciosa que la que tenemos de la que fue la era más larga, el Paleozoico, que la precedió. Esto no significa que los acontecimientos recientes hayan sido más espectaculares o más importantes que los del comienzo de la historia de la Tierra, sino que sabemos más sobre ellos. Por el Cenozoico sabemos que la subdivisión en períodos geológicos es inadecuada como calendario en el que anotar los cambios en nuestro planeta y en nuestros antepasados, aunque el Cenozoico se subdivida en dos períodos, el Terciario, que terminó hace unos 3 millones de años, y el Cuaternario, en el que vivimos. Las *épocas* geológicas, las subdivisiones del tiempo geológico, son mucho más importantes para el resto de la historia.

---

[70] Al menos de acuerdo con ciertas autoridades. Otros argumentan que los insectívoros, mamíferos parecidos a las musarañas que existieron al final del Cretácico, no eran aún primates; sin embargo, James Valentine, profesor de Ciencias Geológicas de la Universidad de California en Santa Bárbara, es uno de los expertos que sitúan el origen de los primates antes de la muerte de los dinosaurios. Véase, por ejemplo, *The Evolution of Multicelular Plants and Animals (La evolución de las plantas* y *animales multicelulares*) en la revista *Scientific American* 239, 3 (septiembre 1978): 105.



La línea de los primates desciende de pequeños y ágiles mamíferos, como esta musaraña arborícola. Incluso el *Aegyptopithecus,* uno de los primeros simios en evolucionar a partir de la línea de los monos hace unos 30 millones de años, no era mayor que un gato doméstico moderno o un conejo. *Copyrigth del British Museum (Natural History).*

También es lógico situar las épocas en contexto a partir del momento presente. El Holoceno comenzó hace 10.000 años tan sólo, al final de la glaciación más reciente. En cierto modo ésta es una división muy poco natural, toda vez que sabemos que estamos viviendo en un interglaciar menor dentro de un lapso más largo de glaciación, de manera que, en cuanto a las condiciones físicas de la Tierra, el comienzo del Holoceno no denota ningún suceso especial. No obstante, está relacionado con un hecho de una importancia crucial para nosotros: el principio de la civilización humana con la invención de la agricultura. Así pues, se trata en realidad de una subdivisión en términos humanos. La época anterior, el Pleistoceno, cubre el resto de los 3 millones de años del Cuaternario y viene precedido a su vez por el Plioceno, que empezó hace 7 millones de años; el Mioceno, que empezó hace 18 millones de años; el Oligoceno, con una duración de 15 millones de años y que empezó hace 40 millones de años; el Eoceno, con una duración de 20 millones de años; y el Paleoceno, que tuvo una duración de 10 millones de años y que fue la primera época del Cenozoico y la siguiente al final del Mesozoico, hace unos 70 millones de años. Pueden

ponerse los números en perspectiva para advertir que el Cenozoico entero, en cuya primera mitad la corteza oceánica mundial se ha renovado, corresponde a la cuarta parte de la historia de los reptiles, y a menos del 2% de la historia global de la Tierra.

Tan próximo a la actualidad que es posible resumir todo el desarrollo significativo de la vida en un párrafo o dos. Durante el Paleoceno y el Eoceno, empezaron a dominar las plantas y a proliferar los árboles de hoja caduca, mientras que los antepasados de las ballenas abandonaron la tierra y regresaron al mar, donde sus antecesores se habían originado. En tierra, del mismo modo que los primeros primates, aparecieron los antepasados inmediatos de los elefantes, caballos, cocodrilos y tortugas, entre otros. En el Oligoceno, hace unos 26 millones de años, comenzó el levantamiento de los Alpes europeos a la vez que África empezaba a empujar hacia Europa, y los fósiles de monos se sedimentaron en diversos lugares de la Tierra.

La mayoría de los mamíferos, incluyendo los monos, se extendieron durante el Mioceno, y las especies se diversificaron. En el Plioceno, sin embargo, las condiciones sufrieron un cambio y muchas de esas especies quedaron diezmadas a causa de una serie de extinciones que culminaron en esas relacionadas con la reciente ola de glaciaciones. Por entonces había muchas más especies de mamíferos de las que podemos encontrar hoy; pero los supervivientes son, por definición, los "más aptos", según las propias palabras de Darwin, y la línea de primates que condujo al hombre parece ser la que estaba mejor provista para sobrevivir a los rigores de la glaciación.

Pero si esta breve discusión sobre los sucesos de los pasados 70 millones de años es adecuada dentro del contexto de los 4.500 millones de años de la historia de la Tierra, apenas lo es en términos de historia y orígenes humanos. Veámoslo con un poco más de detenimiento.

No es siempre posible recoger de los fósiles cada uno de los pasos de la evolución que condujo al hombre, aunque sí es posible recoger las características de esas musarañas que se convirtieron en las principales candidatas para ocupar algunos de

los nichos ecológicos que los dinosaurios dejaron vacantes. La mayor parte de los factores que hicieron que nuestras especies fueran tan afortunadas en los últimos millones de años resultaron de que nuestros antepasados bajaran de los árboles y adaptaran sus técnicas desarrolladas en los bosques a la vida en las llanuras. Pero en la época que ahora estamos considerando, hace unos 70 millones de años, ¡nuestros antecesores más lejanos realizaron la operación inversa! Los pequeños mamíferos que corrían por el suelo de los bosques, con una dieta de semillas e insectos, se encaramaron a los árboles tan pronto tuvieron una oportunidad, y empezaron a buscar semillas, insectos y cualquier cosa que pudieran comer sobre las ramas. La vida en las ramas requirió algunas adaptaciones significativas que aún permanecen en los primates de hoy, sin excluimos nosotros mismos[71].

LA VIDA EN LAS RAMAS

La primera necesidad consistió en unas manos capaces de sujetarse a las ramas y de coger pequeños alimentos tales como insectos, manos con uñas más que con garras, adaptadas para asir y para tareas delicadas. La segunda necesidad consistió en una buena visión en tres dimensiones. Esta visión estereoscópica puede darse con los dos ojos en la parte delantera de la cabeza, funcionando juntos. El tercer requisito lo constituyó la habilidad de sentarse o de permanecer de pie, dejando libres las extremidades delanteras para agarrarse y manipular la comida. Solamente los primates reúnen estas características, aunque

---

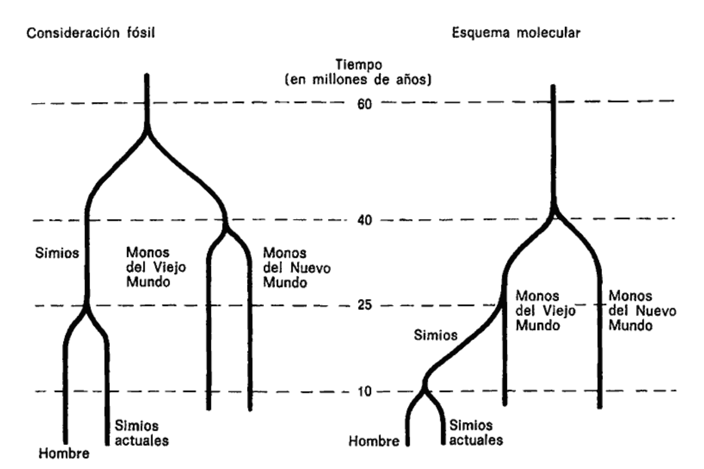
[71] Estrictamente hablando, «miembros de especies poseedoras de los genes que produjeron esas adaptaciones fueron capaces de trasladarse a los árboles, mejorando cada vez más en la tarea de vivir en las ramas como una selección natural que estimula el desarrollo de características más ventajosas.» Los insectívoros no se fijaron prontamente en los árboles, debieron de decirse: «Hum, necesitaré una buena vista para vivir ahí arriba», y desarrollaron una buena vista. Las musarañas con buena vista pudieron obtener comida y se reprodujeron con normalidad; los que carecían de buena vista, por el contrario, no tuvieron muchas oportunidades de transmitir sus genes.

otros mamíferos puedan presentar alguna de ellas, y todos los depredadores, por ejemplo, dispongan de una visión estereoscópica.

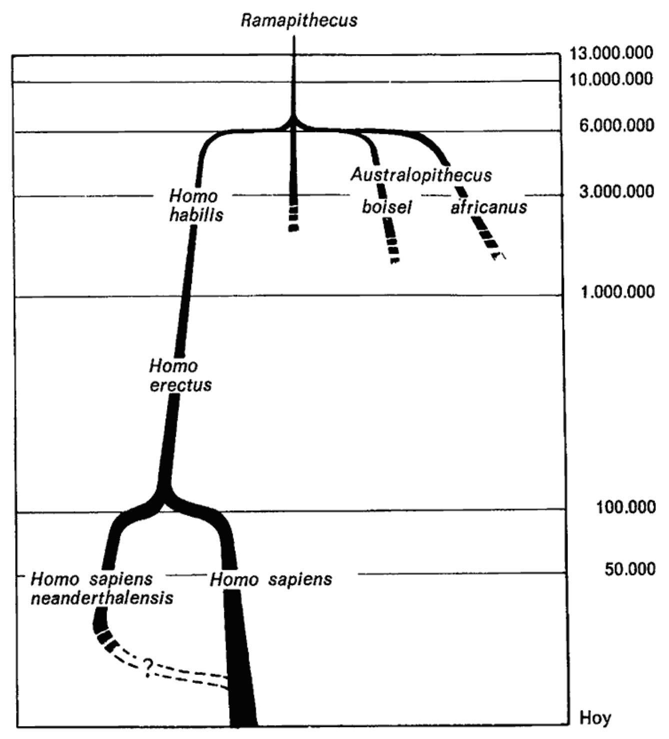
Para sobrevivir en las ramas se hacía indispensable un agudo sentido del equilibrio y unas rápidas reacciones, y aptitud para “trabajar” coordinando los ojos y las manos, a través del cerebro, con el fin de capturar los insectos de la dieta de nuestros antepasados. El traslado a los árboles y la desaparición de la mayoría de depredadores permitió a algunos de los descendientes de los primeros primates nocturnos mudarse a la vida diurna, y en la brillante luz del día, el desarrollo de la visión en color fue una especie de gratificación; no era esencial para la vida en los árboles, pero fue algo que hizo la vida mucho más fácil, y abrió nuevas posibilidades de identificar a otras criaturas, incluso a individuos de la misma especie, y de comunicarse. Ya que la visión en color ayudaba a identificar al menos algunas clases de comida —como por ejemplo la fruta—, los genes a los que concernía esta cuestión estaban destinados a extenderse velozmente en el “patrimonio genético”. Esta aptitud, una vez más, requiere un eficiente mecanismo que procese la información obtenida, un buen cerebro.

Todo esto exigió tiempo. En efecto, fueron necesarios 30 millones de años de evolución para equipar a los descendientes de las primeras musarañas arborícolas con toda la parafernalia de los modernos primates compendiada más arriba, mientras que el orden de los primates se diversificó en una variedad de habitantes de árboles, la mayoría nocturnos y viviendo de una dieta de insectos. Estos prosimios, como se designan, aún subsisten en algunas partes del mundo, principalmente en Madagascar, donde quedaron aislados del continente africano durante millones de años y nunca tuvieron que competir con otros primates más avanzados. Los primates más avanzados, los antropoides, evolucionaron de los prosimios, y los primeros de ellos, los primeros monos, aparecieron hace unos 40 millones de años. Su existencia ha sido revelada por los restos fósiles encontrados en unos estratos a unos 100 km al sur de El Cairo, en Egipto. La llegada de esos primeros monos constituyó una

mala noticia para los prosimios. Mayores y más inteligentes, los monos pronto desplazaron de la vida diurna a los primitivos primates, a la vez que convertían en base de su dieta las hojas y frutas aprovechables, dejando los insectos para un tentempié ocasional, o para los prosimios nocturnos.



Uno de los más curiosos rompecabezas planteados en la actualidad por los estudios evolutivos es el desacuerdo existente entre las escalas de tiempo de la evolución humana, calculada una mediante la tradicional evidencia fósil, y otra mediante la nueva evidencia molecular. ¿Se produjo la escisión mono/simio antes de que divergieran los monos del Viejo y del Nuevo Mundo, separándose las líneas del hombre y de los simios hace 25 millones de años o más? ¿O bien se separaron los simios sólo en tiempos relativamente recientes de la línea de monos del Viejo Mundo, con la escisión hombre/simio dentro de los últimos 10 millones de años? Hoy día existen más evidencias que avalan el esquema molecular; los restos fósiles de nuestros antepasados lejanos son escasos y muy distanciados entre sí. Pero el esquema tradicional se halla establecido como idea aceptada, y actualmente se están realizando esfuerzos para encontrar una escala de tiempo de compromiso utilizando los mejores datos de cada uno de los puntos de vista, en lugar de desechar la evidencia fósil, aun siendo escasa, en beneficio del reloj molecular.



Si se acepta la evidencia de que el *Ramapithecus* fue el antecesor directo del hombre, la probable trayectoria evolutiva de los homínidos puede recorrerse hacia atrás hasta más de 10 millones de años. En anteriores versiones de esta teoría, nuestros parientes australopitecos se ubicaban en estadios intermedios del itinerario directo que conduce desde el *Ramapithecus* hasta el *Homo sapiens*; hoy parece más verosímil que evolucionaran paralelamente a nuestros directos antecesores, como una rama separada del primitivo grupo de los ramapitecos. Éste no es el esquema definitivo; subsiguientes estudios del reloj molecular, en particular, es probable que den origen por lo menos a algunos cambios en un próximo futuro. Pero representa el mejor "árbol genealógico" del hombre que es posible trazar en la actualidad.

Una evolución semejante era inevitable, dado el tiempo suficiente para la constante mezcla de los genes, encaminada a

producir una criatura aún mejor adaptada a la vida en los árboles. Pero hace unos 40 millones de años el clima de la Tierra ya se estaba alterando, después de un dilatado período "tropical" en la mayor parte de la Tierra. Cuando los continentes derivaron hacia su posición actual, la presencia de tierra en las altas latitudes y la inexistencia de agua caliente en las regiones polares empezaron a ser importantes, y los cambios climáticos del mundo que adquirieron significación durante este tiempo tal vez desempeñaron un papel en la evolución de los primates, imponiendo unas duras condiciones para, de este modo, dificultar su supervivencia. Ésta no fue la única consecuencia de la deriva continental en el curso de la evolución de los primates. En el momento en que los monos aparecen en los registros fósiles, África y Sudamérica estaban ya separadas, y parece poco probable que los monos africanos pudieran hacer la travesía —incluso en el entonces estrecho "océano"— entre África y Sudamérica. De hecho hay monos en Sudamérica y, a primera vista, parecen iguales que sus parientes de África. Sin embargo, existen importantes diferencias en sus dientes y en otros rasgos, como la forma de las ventanas nasales, y a diferencia de los monos del Viejo Mundo, de África y Asia, los del Nuevo Mundo tienen la habilidad de usar sus colas casi como una quinta extremidad para sujetarse a las ramas; los monos del Viejo Mundo usan sus colas tan sólo para mantener el equilibrio. Los dos tipos de mono muestran un sorprendente ejemplo de evolución paralela de un antepasado común, un híbrido entre musaraña arborícola y mono que vivió en África y Sudamérica antes de su separación. Cada línea evolutiva seleccionó entonces las mejores características para la tarea de vivir en los árboles y se desarrollaron a partir del material genético disponible, de donde surgió la "respuesta" mono. Pero en el Nuevo Mundo la línea evolutiva se detiene en los monos; las presiones evolutivas que produjeron la adaptación en el Viejo Mundo y que condujeron a los primeros simios y, al fin, a los humanos, simplemente no estuvieron presentes en Sudamérica, donde los

primeros simios en escena fueron los seres humanos que llegaron desde el Viejo Mundo hace unas pocas decenas de miles de años.

LA LLEGADA DE LOS SIMIOS

¿Cuáles fueron los factores que favorecieron la evolución de los primates en el Viejo Mundo, produciendo los primeros simios tan sólo 10 millones de años después de que aparecieran los primeros monos? La mejor respuesta es que en Sudamérica la selva tropical continuó dominando el panorama, y la vida de los monos estaba perfectamente adaptada a esas condiciones. Sudamérica se movía hacia el oeste en aquel baile de continentes, siempre cerca de la región tropical de la Tierra. África, por su parte, se movía hacia el norte, con lo que decayeron las grandes selvas. Un clima ligeramente más seco y la presencia de áreas con menos bosques bastaron para proporcionar un tipo de vivienda algo diferente, y, como siempre, la vida se adaptó para encajar en el nuevo nicho ecológico. El resultado fue la aparición de los simios en la Tierra hace unos 30 millones de años. Desde este momento en adelante estamos hablando de los orígenes del hombre.

El más antiguo fósil identificado perteneciente a un simio procede de la misma región de Egipto que los fósiles más antiguos de monos: la depresión de El Fayum, al sur de El Cairo. Hoy día es una región desértica, pero hace unos 30 o 40 millones de años estuvo poblada por una selva exuberante. Los detalles de cómo los paleontólogos distinguen los fósiles de un simio de los de un mono, o los de un simio particular de los de uno de sus parientes, componen una fascinante lectura, de la misma forma que los argumentos de varios paleontólogos sobre tales distinciones. Pero ésta es una de esas ocasiones en que los pormenores deben sacrificarse en favor de la brevedad, y debemos aceptar que las características de los cráneos con una antigüedad de 28 millones de años, casi completos de no ser por la mandíbula, son simios sin lugar a dudas para los expertos. Este es, pues, nuestro más antiguo y directo antecesor, que

compartimos con otros simios actuales como el chimpancé y el orangután. El nombre dado a este antiguo simio es *Aegyptopithecus*, por su localización en el Egipto actual y del griego *pithecus* que significa "simio". Del mismo modo que los monos son mayores que los prosimios, los simios son, en general, mayores que los monos; estas diferencias están relacionadas con sus distintas formas de vida. Los prosimios corren a lo largo de las ramas, mientras que los monos, con sus potentes piernas traseras, saltan de rama en rama y de árbol en árbol. Los simios son demasiado corpulentos para tales saltos y para balancearse de rama en rama usando sus cuatro extremidades, cuatro manos que emplean para el trabajo. Balanceándose en una rama, un mono tiene tres manos para sujetarse y una mano libre para coger fruta.



El chimpancé, nuestro pariente más próximo, es casi misteriosamente humano en muchos aspectos. Y, sin embargo, ha resultado una sorpresa, todavía no explicada satisfactoriamente por la teoría de la evolución, el descubrimiento de que el chimpancé y nosotros compartimos el 99% de nuestro material genético.

Desde luego, con estas especies tan íntimamente relacionadas las diferencias se borraron. Algunos de los grandes monos actuales se desenvuelven según el modelo de vida típico de los primeros simios; el hombre, por tanto, no es el único primate que ha ensayado la vida en el suelo. A pesar de todo, las amplias desemejanzas indican que las especies se han diversificado en papeles diferentes.

Con la entrada de los simios en la escena evolutiva llegamos a otra subdivisión de especies, los homínidos, sólo representados por el hombre y otros simios. Las distinciones entre especies a este nivel son tan sutiles, y los restos fósiles tan incompletos[72], que es difícil estar completamente seguro de los detalles sobre cómo los descendientes del *Aegyptopithecus* se transformaron en hombres. Al parecer, poco después de que el primer simio apareciera, la línea de los homínidos se dividió en dos ramas principales, una de ellas representada por fósiles del género *Pliopithecus*, el antecesor de los gibones; la otra línea, *Dryopithecus* (que significa "simio arborícola"), parece haberse extendido durante el Mioceno, y se estableció hará unos 20 millones, 8 millones de años después de la aparición del *Aegyptopithecus*. Los fósiles del *Dryopithecus* se encuentran en África, Asia y Europa, y los restos más completos proceden de la región del lago Victoria, al este de África, de donde los extrajeron Louis y Mary Leakey. El verdadero género *Diyopithecus* es el antecesor directo de especies modernas como el orangután y el gorila, pero no probablemente del hombre. Parece que compartimos un antepasado común —aún no encontrado— que podría ser un "driopiteco", del que surgieron el

[72] Una razón de la escasez de fósiles de homínidos es que nuestros antepasados vivían en regiones boscosas ricas en vida, donde los restos de animales no tenían la oportunidad de quedar por el suelo y enterrarse antes de que los borraran o se corrompieran. Este problema, de hecho, puede aplicarse a toda la historia de los primates, que debe reconstruirse a base de fragmentos de huesos, dientes y de cráneos ocasionales. Nuestros antecesores, desgraciadamente, no tenían la costumbre de tenderse para morir a orillas de los ríos —aunque algunos destacados hallazgos se han realizado en esos lugares.

Dryopithecus y dos líneas más. El *Gigantopithecus*, representante de una de éstas, fue el antecesor de una familia de grandes simios que habitaban en Asia y que se han extinguido; el *Ramapithecus*, representante de la otra, parece ser nuestro propio antecesor. Para nuestra frustración, sin embargo, hay un vacío de restos fósiles desde la época del *Ramapithecus* hasta hace unos 5 millones de años. Tal vez se considere un vacío insignificante comparado con la vasta extensión de tiempo desde el origen de la Tierra, o desde el origen de la vida en la Tierra. Pero en este vacío crucial el *Ramapithecus* ¡aprendió, entre otras cosas, a andar derecho! No resulta sorprendente que los paleontólogos estén tan ansiosos por encontrar restos humanos (homínidos, en oposición a las líneas de simios [hominoides]) de un período de hace entre 4 y 8 millones de años.

HERMANOS BAJO LA PIEL

Nuestra llegada a este vacío crucial en los registros fósiles nos ofrece un lugar adecuado para detenemos y ver hasta qué punto es cierta la historia que acabamos de bosquejar. Ciertamente, todas las especies comparten el mismo arranque, nuestros propios antepasados se separaron de las otras líneas de simios hace 15 millones de años, con la llegada del *Ramapithecus*. Pero no hay nada que demuestre que el *Ramapithecus* ha evolucionado hasta convertirse en hombre, y existen nuevas pruebas de que la escisión entre humanos y simios tuvo lugar hace menos de 15 millones de años. Todo estriba en el grado de relación que guardamos con los diversos simios, y la biología molecular es ahora una ciencia suficientemente precisa como para poder comparar las proteínas del ADN de las células humanas con las del ADN de los simios y determinar lo semejantes que somos.

Los resultados de este trabajo, iniciado por los biólogos americanos Vincent Sarich y Allan Wilson[73], son sorprendentes a la luz de la interpretación convencional de los fósiles. La

[73] Y magníficamente expuesto por Colin Patterson en *Evolution* (Boston:

nueva evidencia muestra a las claras que nuestros más cercanos parientes son los gorilas y los chimpancés; la relación con los orangutanes es más remota y la de los gibones todavía más. Hasta aquí no hay grandes problemas con los fósiles. Pero en términos genéticos, las diferencias entre un hombre y un chimpancé, o entre un hombre y un gorila, son *mucho* menores que las diferencias entre un orangután y un chimpancé. Esto nos indica algo muy valioso: puesto que los chimpancés y gorilas son animales africanos, caben pocas dudas de que el origen del hombre está en África. No estamos tan estrechamente relacionados con los simios asiáticos como para habernos desarrollado allí. La primera sorpresa que se desprende de este trabajo es la diversa escala de la evolución humana.

Claramente, si el chimpancé, el gorila y el hombre han tenido un antepasado común, las divergencias entre el material genético de los tres géneros actuales se han producido por medio de mutaciones desde los tiempos de ese antepasado común, mutaciones que cambian sucesiva y levemente los genes. Cuanto más tiempo haya transcurrido desde el antepasado común, más divergencias genéticas deben de haberse producido entre las diferentes especies, ya que han tenido más oportunidades para que se dieran mutaciones. Observando las divergencias en las proteínas —las diferencias entre el material genético— de las distintas especies de mamíferos, los biólogos moleculares han desarrollado una fiable guía sobre la regularidad con que las divergencias se suceden, de manera que son capaces de utilizar estos estudios como un "reloj" para determinar cuándo el hombre se separa de la línea que conduce a los modernos simios. Pero la simple aplicación del "reloj" sugiere que los gibones se separaron de nuestra línea evolutiva hace tan sólo 10 millones de años, el orangután hace 7 millones de años y el chimpancé y el gorila, 4 millones. Sin embargo, hace 4 millones de años, de acuerdo con los registros fósiles, ya había

---

Routledqe & Kegan Paul, 1978).

criaturas similares al hombre. Hay un manifiesto conflicto entre el reloj de los fósiles y el reloj molecular, y algún resultado debe dar.

Quizá la mejor explicación sea que el hombre y el simio han evolucionado más lentamente que los otros mamíferos, con los que se graduó el reloj. Esto podría deberse al dilatado plazo de tiempo que transcurre entre las generaciones, a un vacío mayor entre padres, hijos y nietos que el que presentan la mayoría de los mamíferos; después de todo, a más generaciones en un determinado tiempo, más oportunidades de mutaciones. El reloj molecular, según parece, no mide el tiempo en años sino en generaciones. Otra posibilidad es que el *Ramapithecus* no sea, al cabo, nuestro antepasado directo, y que el reloj molecular nos dé una versión más exacta que la convencional basada en los registros fósiles. Por ahora el problema persiste y lo mejor que podemos decir es que los fósiles nos indican que es improbable que la línea humana se separara de las del chimpancé y el gorila hace menos de 5 millones de años, mientras que el reloj molecular nos indica que es poco probable, incluso teniendo en cuenta factores especiales, que la escisión se produjera hace más de 10 millones de años. Hay margen suficiente para contentar a todas las autoridades, y podemos asegurar que en algún momento de los últimos 10 millones de años nuestros antecesores, posibles descendientes del *Ramapithecus*, ejecutaron el siguiente paso fuera del bosque que tan bien había servido a los primates desde la desaparición de los dinosaurios unos 60 millones de años antes.

Lo que nos convirtió en humanos fue, de cualquier forma, un desarrollo evolutivo muy peculiar. La peculiaridad sólo la han puesto de relieve los recientes estudios moleculares, puesto que la segunda gran sorpresa que de ellos se desprende no es sino nuestra estrecha relación con los gorilas y chimpancés. De hecho, comparando las cadenas de proteínas, el hombre y el chimpancé comparten el 99% de su material genético[74]. ¡Los genes que más nos hacen humanos que chimpancés representan

---

[74] De acuerdo con los estudios de Marie-Claire King y Allan Wilson.

tan sólo el 1% del total! Independientemente de que la técnica molecular nos diga o no algo útil sobre la escala de la evolución, éste es uno de los descubrimientos más asombrosos de toda la historia de la evolución, y es quizá por su pereza mental por lo que los más virulentos críticos de Darwin, en el momento de la publicación de su *Origen de las especies*, prescindieron de este conocimiento. Esto significa, en términos sencillos, que los humanos y los chimpancés difieren menos que algunas especies pertenecientes a un mismo género. Un zorro y un perro, por ejemplo, según las nuevas técnicas, están *menos* relacionados que un hombre y un chimpancé, pese a su apariencia similar. Hoy clasificamos a los animales en categorías según su facilidad para aparearse y generar descendientes (desde luego), y según su apariencia física. Ciertamente, el hombre y el chimpancé son mucho más disímiles en su aspecto físico que lo que puede inducir a pensar la diferencia del 1% del material genético. No es ésta una apreciación subjetiva; las proporciones de los cuerpos humano y del chimpancé (longitud de los brazos comparada con la del cuerpo, anchura de la cabeza, etc.) muestran diferencias reales. Pero hay mucha menos desemejanza, en estos términos, entre una cría de chimpancé y un humano adulto. Parece que la pequeña diferencia genética entre el hombre y el chimpancé reviste tanta importancia porque los genes que han cambiado son los que controlan el crecimiento y el desarrollo del cuerpo; el hombre es una especie de simio "inmaduro" o "infantil" que nunca se desarrolla plenamente comparado con sus parientes, fenómeno conocido como neotenia.

EL SIMIO INMADURO

Los biólogos ya lo han reconocido, y se han dado cuenta de que la mayoría de las características que nos hacen humanos, y que hicieron a nuestros antepasados tan afortunados cuando salieron del bosque, pueden ser descritas en términos de neotenia. Se conoce el fenómeno en otras especies, y puede tener un poderoso efecto en la evolución porque, tal como ha sucedido con

el hombre, las mutaciones en unos pocos genes repercuten de una manera espectacular en la estructura total del cuerpo que habitan. La cuestión que entonces se plantea es por qué el simio neoténico —hombre— ha tenido tanto éxito, y no encontramos mejor respuesta que la que se nos ofrece en el libro de Desmond Morris *The Naked Ape*, publicado unos años antes del descubrimiento de la "similitud genética entre el hombre y el chimpancé, en donde se dice que casi somos "hermanos (¡o hermanas!) bajo la piel".

Con los cambios climáticos que ocasionaron la disminución de los bosques, una criatura como el *Ramapithecus*, que vivió hace unos 10 o 12 millones de años, se vio en problemas. Los descendientes con más éxito —los más aptos en términos evolutivos— son los que mejor se las arreglaron con las condiciones cambiantes, y eso significó bajar de los árboles a tierra, en las extensas llanuras de África. Por ahora, las destrezas de que se valieron esos primates en la primera fase de vida en suelo firme de desconocen; el más importante y obvio ejemplo quizá sea el sentido del olfato, que a nuestros antepasados las musarañas debió de serles de vital importancia para oler a los dinosaurios, pero que ha sido en gran parte reemplazado por la vista en los habitantes de los árboles. Con el tiempo, la evolución sin duda pudo producir una línea de descendientes del *Ramapithecus* con un óptimo sentido del olfato, que caminaran a cuatro patas para mantener la nariz cerca del suelo. Pero los cambios producidos por el desarrollo neoténico son mucho más rápidos que cualquier otro cambio evolutivo, prácticamente sin necesidad de mutación genética. En cualquier especie hay un desarrollo de las proporciones en que los individuos maduran, en algunas más largo tiempo que en otras. De modo que cualquier presión selectiva que favorezca un desarrollo físico lento puede funcionar inmediatamente sobre la población, haciendo que los que se desarrollan con lentitud sobrevivan y se reproduzcan con mayor eficacia. En la población, constituida por los descendientes, se da un nuevo desarrollo de las proporciones de maduración, existiendo ahora una proporción "normal" más lenta, y asimismo se repite el proceso en cada generación. Sólo

unos cuantos genes, los que controlan el desarrollo y el índice de crecimiento de las distintas partes del cuerpo, están implicados, y si alguna ventaja hay en este desarrollo lento, ésta destaca inmediata y efectivamente, igual que entre los pájaros es seleccionado el gen que controla los huevos de una nidada.

Desde luego, en el caso de la maduración lenta existe la necesidad de que el niño sea amparado por sus padres o por otros adultos, pero éste es un rasgo común a todos los simios y también debió de formar parte del modelo de comportamiento del *Ramapithecus.* Se hace entonces necesario que la neotenia resulte ventajosa; el mejor medio para comprender por qué es imaginar los problemas que concurrieron en la adaptación de un simio arborícola, con buena vista, manos bien desarrolladas y un considerable cerebro, a la vida en las llanuras.

La enorme ventaja de un habitante de los árboles en esas circunstancias sería la versatilidad. Una especie que dependiera por completo de los árboles desaparecería a la par de los bosques, pero una capaz de —literalmente— *aprender* nuevos ardides, en lugar de esperar su evolución, gozaría de mejores oportunidades de sobrevivir. Por esto el cerebro debió de representar una ventaja desde el principio de su forzada migración a las llanuras. Muchos animales desarrollan enteramente su cerebro antes del nacimiento, e incluso nuestros parientes más próximos, los chimpancés, alcanzan el máximo crecimiento del cerebro al final del primer año de vida. En los humanos, sin embargo, el cerebro equivale en el nacimiento a sólo una cuarta parte de su tamaño final, y no deja de crecer durante casi veinticinco años. Este desarrollo lento es una característica de la neotenia; significa, en términos prácticos, que el cerebro puede alcanzar un tamaño que sería imposible antes del nacimiento, ya que si el total desarrollo tuviera lugar en el vientre, el niño poseería una cabeza tan desmedida que no podría nacer sin matar a su madre. Un resultado de este crecimiento continuado del cerebro es que los niños, e incluso los adultos jóvenes, están en el mundo aprendiendo de él mientras su cerebro todavía crece, hecho que probablemente explica la adaptabilidad del hombre moderno. El contraste que existe con

animales tales como el ciervo, aptos para correr con la manada casi tan pronto como han nacido, radica en que tienen sus cerebros "preprogramados" para arreglárselas con la vida en manada; nunca aprenderán nada más, están colocados en su lugar por el preprograma.

¿Qué más necesitaron nuestros antepasados? Realmente tuvo que ser una ventaja el poder mantenerse erectos y usar su vista para atisbar los alrededores y prevenir los peligros; esto requiere que la cabeza esté colocada de una manera poco corriente en relación con la mayoría de los mamíferos. Si intenta andar sobre sus cuatro extremidades pronto se percatará de que la posición natural de la cabeza es mirar hacia el suelo. Los mamíferos que andan a cuatro patas se han adaptado a su modo de vida desarrollando una cabeza que forma un ángulo recto con el cuello, de manera que puedan mirar hacia delante; pero si se adiestra a un animal de éstos (un perro, quizá) para que se mantenga sobre sus patas traseras, mirará entonces hacia arriba. Los fetos de los mamíferos, remedando la historia de la evolución, atraviesan por un estadio en que la cabeza forma un ángulo recto con el tronco, como la cabeza del lector y la mía. Y la manera en que mantenemos nuestra cabeza hoy es una reversión a ese estadio fetal, otro ejemplo de neotenia.

Muchas otras características pueden seleccionarse y analizarse de esta forma, pero basta con reparar en que, con un paso evolutivo relativamente simple, la neotenia, nuestros antepasados adquirieron las poderosas ventajas de un mejor cerebro, un cuerpo acomodado a permanecer erguido y capaz de correr con los ojos alerta a cualquier peligro, manos libres para transportar comida o armas, y una infancia más larga durante la cual puede enseñarse al cerebro una forma de vida apropiada por los padres. Dos efectos secundarios, uno trivial y otro quizá primordial, deben mencionarse.

El primero es que somos relativamente lampiños, el "simio desnudo", según el memorable título de Desmond Morris. El feto de un chimpancé, que es muy similar al humano, incluso en la forma de la cabeza y en las proporciones de los miembros, manos y pies, tiene escaso pelo, salvo en la cabeza y la barbilla.

Nuestra desnudez" no es sino un efecto secundario de la neotenia, y es probable" que no represente ninguna ventaja particular en términos de selección natural, toda vez que se trata de algo que trajo consigo el desarrollo neoténico, sin fuertes desventajas que provocaran una selección contraria de los genes de la desnudez. Entretenemos en debatir por qué se ha evolucionado hacia una piel desnuda nos apartaría de nuestro propósito y no merecería la pena.

El segundo efecto, sin embargo, es que la neotenia ha conducido a la característica del comportamiento humano constante de la propagación de nuestra especie por todo el mundo. Los simios jóvenes se singularizan por su curiosidad y sus ganas de jugar, pero en todos los casos, excepto en el hombre, esta fase de exploración desaparece muy deprisa. Cualquiera que sea la causa de este comportamiento —verosímilmente vinculado con el tiempo que el cerebro precisa para crecer—, los humanos mantienen la curiosidad hasta la vida adulta. Esta inclinación a averiguar lo que se esconde detrás de la siguiente colina fue toda la energía que necesitaron nuestros antepasados para conquistar el mundo. Las evidencias fósiles y la comparación de nuestro material genético con el de los simios actuales manifiestan inequívocamente que nuestros antecesores inmediatos proceden de una concreta parte del mundo, del este de África. Pero no *proyectaron* "conquistar el mundo" ni nada parecido. Armados sólo de curiosidad, unos cuantos miembros de cada generación debieron de vagar por las montañas y establecieron sus hogares a unos kilómetros de distancia. Algunos de sus descendientes, a su vez, debieron también de errar por algunas montañas antes de establecerse y constituir una familia. A razón de sólo 16 km por generación, el viaje de Nairobi a Pekín se realizaría en menos de 15.000 años, un abrir y cerrar de ojos en términos evolutivos, con gente que se dispersaba en la ruta y tomaba otras direcciones para desarrollar las características locales por las que distinguimos a un negro africano de un chino amarillo, o a un árabe de un esquimal. El mundo es hoy cual es a causa de te humana combinación de inteligencia

y curiosidad; somos como somos, y el mundo es de esta manera hoy, porque el hombre es el simio que nunca creció[75].

FUERA DE LOS ARBOLES

Todo esto, no obstante, aún pertenecía al futuro cuando la línea del *Ramapithecus* —si es que aceptamos que el *Ramapithecus* fue realmente antepasado nuestro— abandonó el bosque. Es, quizá, de la misma forma que entendemos tan claramente la naturaleza del proceso evolutivo que convirtió al simio arborícola en hombre, ya que no hay restos fósiles de homínidos durante el período de hace 10 a 5 millones de años, y nada más excepto un fragmento de mandíbula, de la cual aún discuten los expertos, hasta hace tres millones de años[76]. Los registros fósiles nos presentan al *Ramapithecus* en la linde del bosque —por decirlo de un modo gráfico— contemplando las llanuras abiertas hace 10 millones de años; la película se interrumpe hasta que encontramos una extrema variedad de homínidos que pueblan el este de África hace 3 millones de años, que trabajan la piedra, cazan animales para obtener carne, fabrican herramientas de madera, etc. El *Ramapithecus* vivió tanto en Europa y Asia como en África, pero lo que le hizo

---

[75] Carl Sagan, entre sus más serios comentarios sobre la evolución de la inteligencia humana, sugiere que cierto tipo de memoria ancestral tal vez sea la razón de muchos miedos y mitos humanos. Los dragones, por supuesto, son los dinosaurios que durante tanto tiempo fueron nuestros rivales y los grandes reptiles que, según apunta, pudieron ocasionar problemas a los hombres hace menos de 65 millones de años. Poco tiempo antes de que nuestra propia línea se convirtiera en la única especie humana de la Tierra, hubo carreras de “hombres” grandes y pequeños, y Sagan especula que la memoria de esos tiempos quizá guarde la razón de nuestras historias de gigantes y “enanos”. En la misma línea, quisiera añadir que la historia de Peter Pan y otras leyendas sobre la eterna juventud están emparentadas con algún profundo e interno conocimiento de nuestra propia inmadurez.

[76] A los expertos no siempre les gusta admitir que sabemos poco acerca del *Ramapithecus,* siquiera algunos fragmentos de fósiles, identificados como los de un antecesor de la línea humana en virtud de la forma de la mandíbula. ¡Sería deseable que esto resolviera de golpe todos los problemas de datación!

evolucionar y produjo semejante diversidad de homínidos debió de tener lugar sólo en África, por razones que no comprendemos. Todo cuanto podemos hacer es reanudar los cabos sueltos de la historia de los orígenes humanos anteriores al vacío, en África, donde el último de los *Ramapithecus* vivió junto a los primeros especímenes de nuestra propia línea *(Homo)* y dos líneas más de homínidos, el *Australopithecus africanus* y el *Australopithecus boisei,* que, si bien estaban relacionados con la línea *Homo,* no parecen ser nuestros directos antecesores. De aquí en adelante, la historia de la evolución humana es, en esencia, la de cómo tal diversidad de homínidos se redujo a uno solo, nosotros mismos. Es ésta una historia que se ha visto transformada durante las dos últimas décadas a causa de los hallazgos de fósiles efectuados al este de África y que progresa con nuevos descubrimientos casi cada año, uno de los grandes desarrollos científicos del siglo XX.

La pulcritud de las etiquetas colocadas por expertos a los restos fósiles de las diferentes especies humanas y casi humanas, y los prolongados vacíos de restos, tienden a ocultar la sutileza de los cambios evolutivos de nuestros antepasados. Si tuviéramos un esqueleto completo de cada generación anterior a mí o a usted hasta, digamos, el *Ramapithecus,* no habría ningún punto en toda la línea de huesos ancestrales en el que pudiéramos observar algún cambio del *Ramapithecus* al *Homo habilis,* del *Homo habilis* al *Homo erectus,* o del *Homo erectus* al *Homo sapiens,* el hombre actual. Pero los huesos de hace entre 500.000 y 1 millón de años serían claramente distintos de los huesos actuales, y de los restos datados en 3 o 15 millones de años antes de la actualidad. Estas ostensibles diferencias de restos separados por cientos de miles o millones de años son la base de las diversas clasificaciones; pero en ningún punto del curso evolutivo se pueden “detectar las junturas”. No hay nada que nos sugiera que un *Homo habilis* con una imprevista mutación diera a luz a un *Homo erectus* y, desde luego, no está probado que esta línea de descendencia sea la línea del origen humano. El *Homo habilis,* a juzgar por los restos de hace 3 mi-

llones de años, fue un descendiente del *Ramapithecus o se* asemejó a un *Ramapithecus*. Los dos "primos", el *Australopithecus africanus* y el *Australopitecus boisei*, que parecen descender de antepasados con apariencia de *Ramapithecus*, también tienen una antigüedad de 2 a 3 millones de años. Antes se creía que formaban parte de la línea principal de la evolución humana, y aunque las evidencias ahora disponibles indican que, más que ser nuestros directos antecesores, forman parte de ramas laterales, la cuestión no está en absoluto aclarada. Lo que sí está claro, sin embargo, es que existieron algunas criaturas antropoides hace 3 millones de años, producto de una afortunada línea evolutiva que se propagaba y diversificaba por diferentes nichos ecológicos. En el curso de los últimos 2 millones de años, ha habido muchas extinciones de especies en la Tierra, muchas de mamíferos y todas —salvo una— de las especies parecidas al hombre. Contrariamente a las extinciones que terminaron con la era de los dinosaurios, no se oculta ningún misterio acerca de esta última ola de extinciones. Coincidió precisamente con una gran ola de períodos glaciales, en particular por todo el hemisferio norte, que fueron propiciados por el lento cambio de las masas continentales hacia latitudes más altas alrededor de un mar polar cerrado, y que ha sido modulado durante los pasados dos millones de años por los ritmos regulares del ciclo de Milankovič, que producen un reiterado flujo y reflujo de hielo por todas las tierras septentrionales.

EXTINCIONES EN LOS PERÍODOS GLACIALES

Las extinciones relacionadas con los períodos glaciales de los últimos millones de años —una época glacial— marcan el final del Pleistoceno. La historia de la evolución humana de los últimos dos millones de años es, entonces, la de una adaptación bajo condiciones de presión evolutiva excepcionales, por cuya causa desaparecían especies emparentadas muy de cerca. La historia ignota de la evolución prehumana durante el vacío de fósiles de hace más de 3 millones de años debió de producir

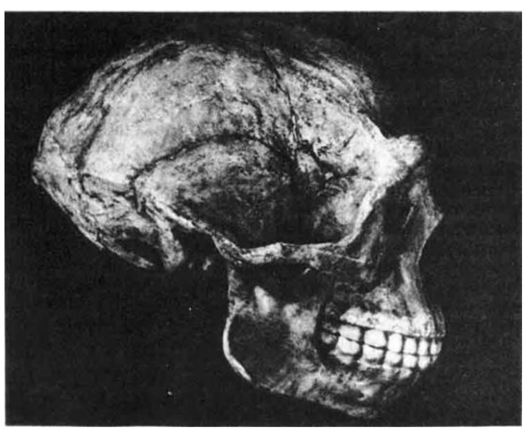
primero una diversificación de las especies similares al *Ramapithecus* para luego crear un pre *Homo* y un pre *Australopithecus*, dividiéndose más adelante el *Australopitecus* en dos formas registradas en los restos de hace 3 millones de años, el *africanus* y el *boisei*[77].

Sólo a partir de la década de los setenta, pese a todo, puede decirse que la historia de la evolución del último par de millones de años es "conocida". Desde, 1972, una sucesión de hallazgos en emplazamientos del este de África ha producido, al parecer, un linaje definitivo, a despecho de los vacíos en los registros fósiles. El descubrimiento crucial fue el del cráneo del *Homo erectus* con una antigüedad de millón y medio de años —el *erectus* fue el antecesor inmediato del *Homo sapiens*, y sus restos se han encontrado en muchos lugares del mundo, en Europa y Asia, donde vivió hasta hace unos 500.000 años. El descubrimiento en África oriental de un cráneo de *erectus* tan antiguo hace suponer que la forma anterior, el *Homo habilis*, se convirtió en *Homo erectus* en África oriental y la especie, entonces, se esparció (bajo el signo de su curiosidad natural) por Europa y Asia. Otro hallazgo particularmente interesante es el de un cráneo de una antigüedad aproximada de medio millón de años que representa el intermediario entre, el *erectus* y nosotros mismos, el *Homo sapiens*. El *erectus* salió de África y se expandió por el mundo; la continua presión evolutiva estimuló el desarrollo de las mejores bazas para la supervivencia

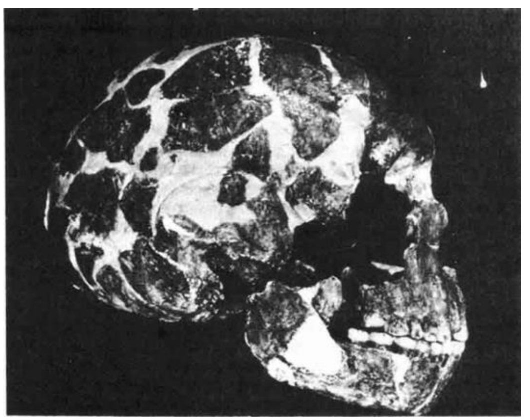
---

[77] La datación de emplazamientos del este africano es, incidentalmente, una tarea muy sencilla, porque durante el período de mayor interés de los últimos millones de años hubo numerosos volcanes activos en la región. Las capas de ceniza volcánica sedimentada pueden datarse con exactitud utilizando isótopos radiactivos y otras técnicas, ¡y un hueso fosilizado entre dos capas de ceniza volcánica ha debido de enterrarse entre esas dos erupciones datadas a la perfección! Resulta fascinante especular sobre el hecho de que las especiales condiciones asociadas con la actividad volcánica y la creación del extenso valle del este de África deben de haber formado parte del modelo de presión evolutiva que originó el surgimiento del hombre moderno, pero esto no es sino una especulación.

y llevó a que el *erectus* se convirtiera en *Homo sapiens,* de manera similar a como los monos del Viejo y Nuevo Mundo evolucionaron por separado a partir de una misma raza.



Cráneo del inmediato antecesor del *Homo sapiens,* el *Homo erectus.*



Cráneo de nuestro más próximo pariente extinto, el Homo sapiens neanderthalensis. *Copyright del British Museum (Natural History).*

Parecerá extraño, en ese caso, que el *erectus* no se diversificara más. ¡Pero lo hizo! Existe una forma ligeramente distinta

de *Homo sapiens* con una antigüedad de unos 100.000 años según los restos fósiles encontrados por toda Europa, en China y en otras partes del mundo. Este era un tipo de hombre adaptado con más efectividad a las duras condiciones de la glaciación, el hombre de Neanderthal, ahora llamado *Homo sapiens neanderthalensis*, por oposición a nuestra propia línea, denominada con más precisión *Homo sapiens sapiens.* El hombre de Neanderthal tuvo mala prensa cuando aparecieron sus restos por primera vez a mediados del siglo pasado. Fueron la primera forma humana arcaica aparecida, y eso condujo naturalmente, en ese tiempo, a la creencia de que el hombre de Neanderthal era un "hombre simio", mientras que la desafortunada coincidencia del hallazgo de un esqueleto casi completo encontrado al sur de Francia, que —como ahora creemos — perteneció a un individuo viejo y artrítico, les indujo a pensar que el Neanderthal era un tipo de persona desagradable, encorvada y brutal. El resultado de los análisis modernos sobre una mayor variedad de restos nos revela lo alejado que esto está de la realidad. El hombre de Neanderthal, según dicen hoy los expertos, era contemporáneo del *Homo sapiens sapiens*, y no un "hombre simio"; es cierto, tenía un cráneo más grueso y de "ceñudo" aspecto, y era más achaparrado que los de nuestra propia línea. Pero en realidad poseía un cerebro mayor que el nuestro y sostuvo una vida compleja en las durísimas condiciones del norte de Europa. Desde la culminación del último período glacial, han sido desenterrados los restos de un cementerio, con una antigüedad de 60.000 años, en las montañas de Irak. A los individuos enterrados se les rodeaba de montañas de flores de los prados cercanos, como nos revela el polen conservado en el suelo de la cueva. Es ésta una fascinante incursión en la vida de ese tiempo. Además, las especies de flores empleadas en los entierros eran tradicionales hierbas medicinales. La gente que llevaba a cabo el entierro, que rodeaba a su difunto amigo o pariente con flores, era claramente "humana" en toda la extensión del término y tal vez tuvo conocimientos de la medicina herbaria. Por si el lector no lo ha adivinado, ellos también fueron hombres de Neanderthal, no *Homo sapiens sapiens.*

¿Qué les sucedió a los hombres de Neanderthal? El más joven de sus restos está datado en unos 30.000 años. Acaso no pudieron, al fin, competir con éxito con los más eficientes *Homo sapiens sapiens.* Aunque no hay indicio alguno de que hubiera conflicto entre ambos, si nuestros antepasados consumían la mejor comida, los hombres de Neanderthal se quedaban sin nada. Sucediera lo que sucediere, puede estar relacionado con el calentamiento del final de la última glaciación, ya que sus restos se encuentran principalmente en el norte. Con toda seguridad, sin embargo, no fueron "barridos" en el sentido ordinario de la palabra. El hombre de Neanderthal y lo que llamamos género humano apenas tuvieron tiempo de apartarse el uno del otro, e incluso pudieron llegar a cruzarse. Las diferencias entre ambos eran insignificantes, diferencias tribales. Los hombres de Neanderthal quizá se cruzaron con el *Homo sapiens sapiens,* de manera que sus genes, diluidos de algún modo, podrían pervivir en el hombre de hoy. Y así lo espero. No tengo ninguna objeción en estar emparentado con una gente que llevó a cabo un entierro en la cueva de Shanidar en los montes Zagros un día de junio de hace 60.000 años.

EL HOMBRE MODERNO

En términos genéticos, la historia de la evolución se pone virtualmente al día con el surgimiento, hace medio millón de años, del *Homo sapiens* y con el breve experimento del hombre de Neanderthal. El relato de cómo el *Homo sapiens sapiens* —afectado por la sucesión de los recientes períodos glaciales y los cambios de los bosques y praderas— desarrolló la civilización requeriría otro enfoque, un enfoque tan extremo que sólo podría dispensarse con otro libro. Por fortuna, este trabajo se ha realizado multitud de veces[78], de modo que, con la conciencia tranquila, puedo detener la historia de los orígenes humanos en el experimento de Neanderthal. De aquí en adelante, al final

[78] El mejor es el de Jacob Bronowski: *The Ascent of Man* (Londres: BBC. 1973).

del reciente período glacial, sólo era cuestión de usar los esquemas desarrollados por la evolución; la invención crítica, hace unos 10.000 años, fue la agricultura, que condujo al sedentarismo, al comercio, a los pueblos y ciudades, y (no se olvide) a la guerra. Antes de dejar el relato de manera definitiva, quisiera hacer hincapié en este último punto, la agresión humana, ya que se ha sembrado mucha confusión en tomo a nuestros "terribles instintos cazadores" e "incontrolables impulsos de lucha". La verdad es que nuestros antepasados cazadores llevaban una vida mucho más pacífica que los primeros agricultores; la culpa de la guerra puede atribuirse a la agricultura y al concepto de propiedad ¡y no a nuestros antepasados cazadores!

Las antiguas formas de vida, tribus de cazadores-recolectores, perduran hoy en diversas partes del mundo; cabe destacar a los kung que viven en la franja septentrional del desierto de Kalahari. Mediante el estudio de la forma de vida de estas gentes bajo duras condiciones, los antropólogos se forjan una idea de cómo vivían nuestros antepasados. La primera sorpresa es que, aun en las franjas del desierto de Kalahari, la vida es fácil. Incluso el término "cazador-recolector" resulta inapropiado, ya que la mayor parte de sus alimentos proviene de la recolección, y se ha sugerido, como más pertinente, el término "recolector-cazador". Los kung se alimentan básicamente de nueces, existentes con profusión en esa parte del mundo, que les dan una cantidad de 1.260 calorías y 56 gramos de proteínas por día, y no ven ninguna necesidad de dedicarse al cultivo cuando la naturaleza les provee de los frutos que coger. También comen frutas, granos, etc., y carne de varios animales y aves. La caza es el trabajo que compete a los hombres: cada hombre debe invertir en la caza unas diecinueve horas a la semana. La recolección es el trabajo que compete a las mujeres, y sólo les ocupa unas cuantas horas al día.

En este caso particular, la vida fácil estriba en la cantidad disponible de nueces, pero aunque el alimento básico varíe, el éxito de la forma de vida de los recolectores-cazadores en muchos lugares del mundo presenta un típico esquema similar.

Después de todo, si ésta fuera una forma de vida precaria, ¡nuestros antecesores nunca hubieran sobrevivido como lo hicieron durante tantos millones de años antes de la invención de la agricultura! Hay una clave, sin embargo, para esta forma de vida y está en relación con el bajo índice de natalidad, que mantiene una población estable en consonancia con los recursos existentes; en este caso concreto, con el número de nueces.

Las mujeres kung, como promedio, sólo tienen hijos cada cuatro años; por consiguiente, cada mujer sólo da a luz a cuatro o cinco hijos en toda su vida fértil. Con que sobrevivan la mitad de los niños, queda asegurada la población básica. ¿Cómo ocurre esto? En parte parece estar relacionado con la larga temporada que amamantan a sus hijos, lo que contribuye a crear un efecto anticonceptivo natural[79]. Y en parte porque el infanticidio, especialmente el de las niñas, es aceptado, si se encubre, en las tribus de recolectores- cazadores. De acuerdo con el ambiente, los recolectores-cazadores saben que un niño nacido "poco después" que un hermano sufre y puede llegar a morir. Nuestros antecesores no tuvieron en su mano criar hasta la edad adulta a un buen número de niños hasta que la agricultura produjo excedentes de comida, lo cual dio inicio a la explosión demográfica.

[79] Recientemente se ha vinculado la efectividad de este anticonceptivo natural con la frecuencia con que se mama. Las comidas del niño, "pequeñas y a menudo", parecen provocar en la madre un flujo constante de la hormona apropiada.



Miembros de la tribu kung. Estudios sobre cazadores-recolectores como los kung han abonado el mito de que nuestros antepasados vivieron de la caza y desarrollaron el “instinto de matar”. Estas tribus, que viven en regiones del mundo consideradas marginales para la vida humana en términos actuales, en realidad basan su existencia en la recolección de alimentos accesibles, como los frutos secos, sin tener que trabajar muy duramente para ello. La caza es una ocupación ocasional, no una forma de vida; nosotros descendemos no de una estirpe de asesinos, sino de una familia de recolectores que se aprovechaban de cualquier alimento que encontraban en su camino, sin pensar demasiado en el futuro. La mayor parte de los problemas en torno a la violencia asociados a la vida moderna —guerra, robo y demás— pueden vincularse de una manera directa con la invención de la agricultura, con la necesidad tanto de planificar para el futuro como de almacenar las cosechas, y con el concepto de propiedad. La agricultura, así parece, conduce al asesinato; nuestros antepasados —y los kung hoy día— se describen mejor no como cazadores-recolectores sino como recolectores-cazadores. *Copyright del British Museum (Natural History).*

La comprensión de esta forma de vida de los recolectores-cazadores desveló la equivocación de teóricos tales como Robert Ardrey, quien dice que la precisión de cazar para sobrevivir de nuestros antepasados, les hizo evolucionar hasta los asesinos potenciales que somos hoy. De hecho, todas las evidencias aconsejan pensar que nuestros antecesores fueron recolectores que cazaban un poco' y que carecía de la necesidad de desarrollar un "instinto asesino" puesto que tenían a su alrededor comida de sobra. Richard Leakey y Roger-Lewin, en sus libros *Origins* y *People of the Lake*, señalan de un modo convincente que la clave del origen humano está no en la caza ni en la recolección, sino en la combinación de ambas, en una economía recolectora-cazadora, que es lo que hizo tan especiales a nuestros antepasados. En cuanto a los conflictos sangrientos entre miembros de la misma especie, sea el hombre o cualquier otro animal, son la vía más rápida hacia el fracaso evolutivo. Los genes de la lucha hasta la muerte no sobreviven bien, ya que los cuerpos en los que residen a menudo sucumben en una pelea; los genes "con éxito" son los que provocan el fanfarroneo y la burla en la batalla en caso de disputas (por una hembra o un territorio, quizá), pero pronto reconocen la derrota y viven para fanfarronear otro día. Y no hay razón para cuestionar —como hace incluso una autoridad tan respetable como Desmond Morris en su libro *The Naked Ape*— que esas señales de "fanfarroneo" dejaron de ser adecuadas cuando nuestros antecesores cogieron por primera vez una piedra y la emplearon como arma, de manera que lo que en principio fuera una amenaza se convirtiera en un crimen sangriento. Si las armas fueron utilizadas en conflictos por nuestros antepasados hace 5, 6 o 10 millones de años, las leyes de la genética dispusieron de suficiente tiempo para operar. De nuestros antecesores, los ávidos de lucha morían en lucha, dejando que los supervivientes con menos avidez de guerra se reprodujeran y produjeran la siguiente generación.

AGRICULTURA Y AGRESIÓN

No, la fuente de nuestra conducta agresiva y de nuestra predilección por la guerra debe buscarse más cerca en el tiempo. El argumento de que nuestras "señales" naturales han sido colmadas es bueno, pero sólo puede aplicarse a un suceso tan reciente que la adaptación al cambio de situación aún no ha ocurrido. El único candidato es la invención de la agricultura, hace unos 10.000 años. Como ya he indicado, esto desencadenó una explosión demográfica, y no hay discusión sobre el hecho de que no hemos evolucionado para que un inmenso número de personas ocupe espacios reducidos, como Desmond Morris subraya en otro libro, *The Human Zoo.* La agricultura proporcionó algo nuevo por lo que pugnar. En primer lugar, la agricultura requiere que el campesino permanezca en la tierra durante todo el año, en vez de errar en busca de comida. De modo que las comunidades se desarrollan, con acumulaciones de comida y campos repletos de cultivos. De la misma forma que sucede en la representación paloma/halcón, para quien nunca se ha molestado en cultivar nada resulta obviamente más fácil llegar y robarlo, en tanto que el granjero debe luchar o morir de hambre. La diferencia entre hoy y hace 10.000 años es que la situación no depende de un programa genético prefabricado, sino de la habilidad de nuestra especie para razonar lo que le resulta más conveniente.

Desde entonces siempre ha habido conflictos por la comida, la tierra, la propiedad y el "espacio vital". Las posesiones fomentan el conflicto, y, en tanto que la propiedad no debe ser robada, el aforismo "la propiedad es guerra" parece del todo apropiado.

De igual manera que en la representación halcón/paloma, cualquiera podría prosperar cooperando; pero la expectativa de una posición más ventajosa para una minoría —digamos un país—, a la que puede accederse mediante la guerra, es tan grande que alguien —algún país— está casi obligado a intentarlo. Esto, y no el mito de nuestro linaje cazador, es la causa del conflicto humano. La diferencia, otra vez, es que nosotros

somos conscientes de la situación y *no* estamos dirigidos por las ciegas instrucciones de nuestros genes. Y es importante reconocerlo. Si estamos programados para guerrear, será difícil ver cómo evitar el último conflicto; pero si estamos programados para una tranquila vida de recolector, y meramente nos han ofuscado los recientes desarrollos, entonces quedan razones para buscar y esperar encontrar una solución inteligente a los problemas de desigualdad en el mundo de hoy. Si fallamos y un holocausto nuclear destruye la civilización, esto no indicará por fuerza que la *inteligencia* sea un "fracaso" en términos evolutivos, puesto que los kung, entre otros, usan su inteligencia para conservar su forma de vida. Tal vez indicará que la agricultura fue un error, lo cual es una interesante idea. Pero, en la otra cara de la moneda, si, pese al error de la agricultura, somos capaces de evitar el desastre, esto significará que la inteligencia es en verdad un factor evolutivo extremadamente útil. La evidencia de que la explosión demográfica está empezando a ser controlada da a entender que hay al menos una vislumbre de esperanza. Quizá duremos más que los dinosaurios; quizás incluso desterraremos la vida del planeta y la devolveremos al espacio, de donde las primeras moléculas vivas llegaron a la Tierra. Pasando por alto los últimos 10.000 años de historia, que nos refieren de dónde venimos, sólo nos resta la perspectiva del adónde vamos. Los orígenes del hombre y del Universo parecen comprendidos, pero ¿cuál es nuestro destino?

IX. DESTINOS

El futuro del hombre y el Universo pueden examinarse con la misma variedad de escalas de tiempo que nuestros orígenes. En las escalas de tiempo más cortas, los venideros 50 ó 100 años aproximadamente, el futuro se halla por entero en nuestras manos. Durante la década de los setenta, hizo su aparición una plaga de sombríos pronósticos, muchos de ellos abocados por la idea de que nuestro planeta se encuentra ya sobrepoblado y de que va a resultar imposible alimentar a la población de principios del siglo XXI. Unos cuantos futurólogos, de manera notable el grupo del Hudson Institute encabezado por Hermán Kahn, han emitido pronósticos que superficialmente parecen extravagantes relatos de ciencia ficción, visiones de abundancia para todos a la vuelta de la esquina, cuando la supertecnología elimine por fin los últimos trabajos penosos de la vida humana. Y en el comienzo de la década de los ochenta, cuando los primeros indicios de la supertecnología han irrumpido con los microprocesadores, los agoreros hablan de desempleo masivo, al tiempo que los optimistas hablan de más "tiempo de ocio" cuando los robots asuman la tarea de los esclavos. El hecho de que tanto los optimistas como los pesimistas resulten convincentes demuestra, sin embargo, cuán amplias son las posibilidades con que nos enfrentamos. Ambos puntos de vista pueden resultar acertados, depende de lo que hagamos ahora; lo más verosímil, desde luego, es que el futuro inmediato, dentro todavía de nuestro tiempo de vida, no produzca ni el colapso de nuestra civilización ni el advenimiento de un nuevo paraíso sobre la Tierra. Seguramente, para salir adelante, nos las arreglaremos muy bien con unos —ciertas naciones y bloques de naciones— y bastante menos bien con otros.

La diversidad entre ricos y pobres, entre los que "tienen" y los que "no tienen nada", recibió una asombrosa publicidad en 1980 con la publicación del informe de la Comisión Brandt

acerca de la disociación entre el Norte y el Sur en términos globales. La publicidad se debió no tanto a que el informe contuviera algo llamativamente original, cuanto que apareció avalado por nombres de políticos tan respetados como Willy Brandt, de Alemania Occidental, y Edward Heath, del Reino Unido. Los dieciocho miembros de la Comisión, pertenecientes a otras tantas naciones distribuidas por los cinco continentes, ofrecieron consejos para la solución de los grandes problemas con que se enfrenta el mundo actual, que se resumen en una sola palabra: "igualdad". Tensión y problemas continuarán existiendo mientras se mantenga la abismal diferencia entre ricos y pobres; aunque la Comisión Brandt no lo menciona explícitamente, nos enfrentamos todavía con los problemas de posesiones que tuvieron su principio ¡en la invención de la agricultura! En términos simplistas e idealistas, si los recursos de la Tierra se administraran con sensatez y se repartieran con justicia entre todas las naciones y entre todos los individuos de estas naciones, las causas de conflicto desaparecerían junto con la pobreza, el hambre y la enfermedad. El informe de la Comisión va más allá de algunos de los pronósticos, explicando en clave política cómo sería ello realizable. En los términos que he utilizado en este libro el problema estriba en mantener una población de "palomas" en la cual cada uno recibe su justa parte. Tal situación puede muy bien proporcionar la mejor oportunidad a cada uno de los miembros de la población, pero inicialmente existe una enorme ventaja "evolutiva" para cualquier halcón que trate de usurpar una porción mayor de la que le corresponde. Si sólo interviniera la genética, no habría manera de que una población de "palomas" se mantuviera estable. Pero ya no podemos contemplar la evolución de la especie humana en términos genéticos; poseemos la capacidad y la inteligencia para considerar acciones alternativas y calcular sus resultados antes de escoger la más beneficiosa. Afrontamos hoy día la mayor prueba a nuestro tipo de inteligencia, tal vez el más crucial y decisivo momento del desarrollo humano desde la invención de la agricultura. Si seguimos la línea de acción más favorable para la mayoría, tras unas décadas dificultosas,

nuestro futuro estará asegurado, y quizá las fabulosas predicciones del Hudson Institute no resulten tan fuera de lugar. La alternativa es que una minoría, los halcones, inviertan su inteligencia y previsión en adueñarse de lo máximo posible. Ésta es la conducta seguida a lo largo de todo el tiempo que registra la historia, y los "halcones" han sido naciones como Inglaterra, los Estados Unidos, Japón, los países europeos, la Unión Soviética y el bloque oriental. No existen realmente "palomas" en el mundo actual, por cuanto países que "no tienen nada" se encuentran dispuestos a seguir el mismo camino que las naciones hoy ricas han venido recorriendo. La perspectiva no es muy buena, pero el informe de la Comisión Brandt es un significativo destello de luz en la oscuridad.

CRECER PARA SOBREVIVIR

Lo que está muy claro, y no debe recalcarse, es que los límites físicos de la "capacidad de mantener" de la Tierra todavía no se han alcanzado. Yo fui uno de los muchos a los que persuadieron las lamentaciones de la brigada del día del juicio final de que el fin se nos echaba encima a principios de la década de los setenta. A consecuencia de ello permanecí tres años en la Science Policy Research Unit (SPRU) de la Universidad de Sussex, trabajando junto a un equipo que estudiaba los recursos futuros del mundo en general, y los problemas de alimentación, energía y materias primas, en particular. Tales estudios demostraban sin lugar a dudas que resultaría fácil alimentar adecuadamente incluso al doble de la actual población mundial, haciendo uso de la tecnología presente, aplicada con inteligencia a la tierra de cultivo existente. En el mundo muere gente de hambre porque carece de dinero (a nivel individual o nacional) para comprar comida en los mercados mundiales, grave acusación contra el sistema económico actual. Con que sólo una pequeña parte del esfuerzo dedicado a gastos de "defensa" se desviara para satisfacer las necesidades de los hambrientos, la muerte por inanición podría ser erradicada del mundo y la población se estabilizaría. Tampoco los problemas relativos a la

energía y materias primas son insuperables, aunque, claro está, la prioridad debe tenerla la alimentación. Ya se observan signos evidentes de que la explosión de la población está retrocediendo, y de que los días del crecimiento exponencial —que tanto asustó a los agoreros de hace diez años— han quedado atrás[80].

Desde el amplio punto de vista del Universo, existe una fundada esperanza de que la raza humana sobreviva lo suficiente como para interesarse por los cambios que ocurran como resultado de procesos naturales tanto en nuestro propio planeta como en el exterior. *Si* no nos acarreamos la ruina nosotros mismos, nuestros descendientes van a ser testigos de —o incluso interferir en— procesos naturales que evolucionan en una escala de tiempo de decenas y centenas de millares de años (por ejemplo, los períodos glaciales), e incluso de millones de años (períodos de tiempo en los que se hacen perceptibles los efectos de la deriva continental y de la actividad tectónica a largo plazo). El peligro natural más inmediato con que se enfrenta la "civilización tal como la conocemos" es el advenimiento de la próxima glaciación plena, advenimiento seguro y conforme con los vigentes estándares geológicos. Recordemos que con la actual disposición de los continentes, los ciclos de Milankovič dominan los ritmos de las glaciaciones, y que en números redondos los "interglaciales" entre dos períodos glaciales completos abarcan unos 10.000 años. Se cumplen ya unos 10.000 años desde que el último período glacial se extinguió, y proyectando hacia el futuro los ritmos engranados de los ciclos de Milankovič, podemos pronosticar con bastante seguridad que, si todo ocurre igual, el mundo se irá enfriando en el curso de

[80] Informé de los hallazgos del equipo SPRU en mi libro *Future Worlds*, porque el debate sobre los "límites del crecimiento" es todavía considerado por muchos, equivocadamente, como sinónimo de "debate sobre el futuro". He incluido en este libro, como Apéndice B, un artículo sobre este tema que originalmente se publicó en la revista *New Scientist*. La más completa exposición del debate sobre el futuro en conjunto es *World Futures*, editado por M. Jahoda y C. Freeman, publicado en el Reino Unido por Martin Robertson y en EE.UU. por Universe.

los próximos 5.000 años, ingresando en una nueva glaciación dentro de este tiempo. El hielo mantendrá entonces cubiertas las masas de tierra septentrionales por espacio de unos 100.000 años; no deja de ser irónico que los países que se llevarían la peor parte son casi exactamente aquellos que hoy constituyen el "rico Norte". Acaso ellos —nosotros— merezcan esa suerte. Aunque no es muy probable que esto suceda.

Esta vez, en relación con los ciclos de Milankovič, "no todo va a ocurrir igual" y es preciso tomar en consideración un nuevo factor. Las actividades del hombre están alterando ya de un modo sustancial la composición de la atmósfera de la Tierra con el aporte de dióxido de carbono, causa de la quema de combustibles fósiles, y con la devastación de las selvas tropicales. El efecto de esta alteración probablemente será un pequeño, pero significativo, calentamiento de nuestro planeta, debido a un incremento del efecto de invernadero. Esto, en sí mismo, puede ser o no ser suficiente para impedir la "próxima" glaciación. Pero no cabe la menor duda de que si sobrevivimos durante otros mil años y logramos crear una genuina sociedad global, en la que los recursos se concentren en los problemas reales, nuestros descendientes gozarán de la capacidad de manipular el medio ambiente, hasta el punto de evitar impedir la extensión del hielo, si así lo desean, desde luego.

GEA Y EL HOMBRE

Una pista de lo que puede constituir una buena razón para no desbaratar los planes globales mediante interferencias con los ritmos naturales procede de Jim Lovelock, investigador británico que ha desarrollado lo que ahora se conoce como la "hipótesis de Gea", el cual, con base en ideas convencionales sobre el equilibrio ecológico entre las diferentes clases de organismos vivientes sobre la Tierra, ha llegado a la aparentemente lógica conclusión de que, a lo largo de miles de millones de años, la vida terrestre ha ayudado a mantener una situación estable, con condiciones favorables a la vida. A pesar de las grandes extinciones que han tenido lugar de vez en cuando desde

que la vida se inició en la Tierra y convirtió la atmósfera a un estado rico en oxígeno, ha habido muy escasas fluctuaciones en la temperatura, en la composición atmosférica, etc. ¿Podría esta estabilidad haber sido sólo un caso de buena suerte? Lovelock insiste en que ello es inverosímil, y señala los terribles ejemplos de Venus y de Marte como planetas abandonados a su propio azar, sin reguladores que mantengan este tipo de estabilidad.

Trabajando con Lynn Margulis, que fue pionera de la idea de que las células actuales se formaron por la fusión de diferentes clases de células primitivas simples que aprendieron a asociarse en una aventura común, Lovelock ha conseguido explicar, en principio, cómo la estabilidad del actual sistema atmosférico se mantiene a través de una variedad de controles y equilibrios en los que intervienen organismos tan impensados como las bacterias que producen gas de los pantanos, las turberas que captan el carbono y evitan así que se incremente la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, y otros no menos curiosos. La idea de una casi sensible y única criatura-Tierra (llamada Gea, como la diosa-Tierra de los griegos) resulta tan extraña que la hipótesis de Lovelock infunde recelo en la mayor parte de los científicos. Y sin embargo, no resulta menos probable el que muchas de las diversas formas de vida de la Tierra estén manteniendo de modo inconsciente la estabilidad del medio ambiente a través de una variedad de controles y equilibrios, que el que miles de millones de células individuales, cada una de ellas constituida por la combinación armónica de formas celulares primitivas, cooperen para dar origen a un ser humano que mantiene la estabilidad de la temperatura corporal, rechaza las infecciones e incluso procura consciencia a un cerebro inteligente. Utilizando un lenguaje que haría dar un respingo a un genetista, podríamos conjeturar que la humanidad fue “inventada” por Gea para que le sirviera de cerebro inteligente y de sistema nervioso, supervisando el planeta en su conjunto y cuidando de problemas que no podrían ser solucionados tan fácilmente a través de mecanismos de regulación in-

conscientes. Para desgracia de Gea, en estos momentos nosotros producimos más daño que beneficio. Tal vez lo mejor que podríamos hacer sería plantar árboles a gran escala para que extrajeran dióxido de carbono del aire, y dejar que los períodos glaciales siguieran su ritmo secular, mientras nos sometemos a ellos y aprendemos a adaptamos a las necesidades de Gea, en lugar de destruir el equilibrio natural para satisfacer nuestra conveniencia a corto plazo. Lovelock y Margulis no se muestran preocupados por que podamos romper el equilibrio de tal modo que Gea no sobreviva: mucho antes de que esto llegara a ocurrir, las condiciones se alterarían tan drásticamente que nuestra especie —por lo menos los miembros “civilizados” de ella— sería barrida y Gea podría entonces reconstruirse, como ya lo hizo tras crisis anteriores, tales como la asociada a las grandes extinciones de fauna de hace unos 225 millones de años. Es en nuestro *propio* bien, de acuerdo con la hipótesis de Gea, en el que deberíamos trabajar a favor y no en contra de los sistemas naturales que mantienen el medio ambiente confortable de nuestro planeta. Uno de los ejemplos de nuestro papel de “cerebro y sistema nervioso” de Gea, ejemplo tomado del mismo Lovelock, se ajusta netamente al hecho de las anteriores grandes extinciones de fauna y a una de las ideas desarrolladas al principio del capítulo 8. Cualquier día, como hace notar Lovelock, un enorme asteroide puede chocar con la Tierra, como ya ha sucedido en el pasado:

«El daño potencial de esa colisión podría ser grave, incluso para Gea... con nuestra tecnología actual es muy posible que pudiéramos salvamos nosotros y a nuestro planeta de un desastre... usando parte de nuestras reservas de bombas de hidrógeno y grandes cohetes espaciales... para convertir un choque directo en un tiro errado cerca del blanco[81].»

Por consiguiente, el valor potencial para Gea de una especie como la nuestra es claro, aunque Lovelock parezca no reparar

---

[81] J. E. Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth* (Londres: Oxford University Press, 1979), página 147.

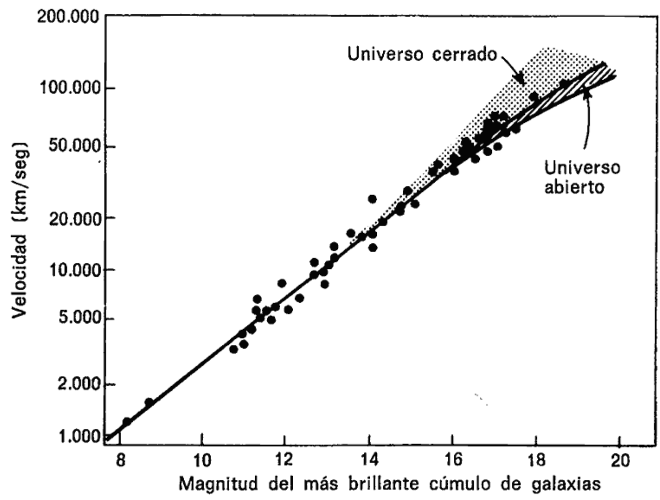
en la ironía de que puede haber sido muy bien la catástrofe que él cita, el choque de un enorme asteroide, la que exterminó al anterior aspirante al papel de sistema nervioso de Gea, el *Sauromithoides*, hace 65 millones de años.

EL UNIVERSO ANTROPICO

Con independencia de lo lejos que queramos llegar con la hipótesis de Gea, de lo que no cabe duda es de que somos criaturas de la Tierra, desarrolladas y adaptadas a las condiciones imperantes sobre la Tierra. Igualmente cierto es, sin embargo, que somos criaturas del Universo, desarrolladas y adaptadas para ocupar nuestro lugar en el entorno a escala cósmica, aunque esto sea menos obvio a primera vista. De hecho, algunos lo encuentran tan poco obvio que la compatibilidad de nuestro Universo con la vida, tal como la conocemos, se suscita algunas veces como un serio problema filosófico o teológico. ¿No resulta extraordinario —propone este tipo de argumento— que el Sol se encuentre justo a la temperatura adecuada para mantener la Tierra caliente, y que mantenga justo esta temperatura durante el tiempo necesario para que se desarrolle la vida? ¿No resulta extraordinario de veras que todos los procesos acaecidos desde el *Big Bang* hayan sido los precisos para producirnos? La manera en que se formaron las galaxias y las estrellas y se constituyeron los planetas, incluso fundamentos como la fuerza de la gravedad, parecen haber sido hechos a medida de las necesidades de los habitantes de la Tierra. De hecho, lo que ha ocurrido, naturalmente, es que hemos sido *nosotros* los hechos a medida para encajar en nuestro entorno, incluida la fuerza de la gravedad y la temperatura del Sol. Nuestra forma de vida depende, por delicados y sutiles mecanismos, de algunas aparentes "coincidencias" en las leyes fundamentales de la naturaleza que hacen funcionar el Universo. Sin dichas coincidencias, nosotros no estaríamos aquí tratando de resolver el problema de su existencia; así, por definición, todo universo en el cual existimos para tratar de resolver enigmas debe propor-

cionar enigmas para resolver. Los cosmólogos pueden construir modelos de universos con diferentes leyes físicas, y podría ser que tales universos existan o hayan existido (la intuición vulgar sobre la simultaneidad más bien se desmorona cuando se pone a ponderar cuándo y dónde puede existir otro universo). El “principio antrópico” afirma que nuestro Universo parece estar hecho a nuestra medida porque criaturas como nosotros sólo son capaces de evolucionar en este tipo de universo; y Bernard Carr y Martin Rees explican exactamente lo que esto significa en un detallado artículo publicado en *Nature* en 1979.

Sin entrar en minucias, algunas de las “coincidencias” relevantes para la vida en nuestro Universo se explican en términos simples. Volviendo al principio del Universo en el *Big Bang*, los cálculos muestran que, cuando alrededor de un 20% del hidrógeno original se transformó en helio en el seno de la bola de fuego, sólo un pequeñísimo cambio de una de las constantes que determinan la velocidad de la nucleosíntesis —la constante de la fina estructura— habría conducido a un modelo de universo radicalmente distinto, provisto de muy poco helio, o bien de muy poco hidrógeno. Tal situación —tanto una como otra— nunca habría producido la clase de estrellas que juzgamos típicas en nuestro Universo, y, sin ellas, la vida habría sido muy diferente, si es que hubiera podido desarrollarse. Una “coincidencia” bastante menos abstracta es la que se refiere a los tamaños relativos de los objetos en el Universo. Una manera de medir las proporciones de un objeto a escala humana en comparación con el tamaño de una molécula o de una galaxia es el empleo de la “media geométrica”, que consiste en multiplicar el número grande por el pequeño y extraer la raíz cuadrada para obtener lo que debería ser un número “típico” entre ambos extremos. Este método proporciona una auténtica escala de tamaños para comparar lo desmesurado con lo diminuto, y elimina algunos de los problemas que estorban cuando se efectúan estas comparaciones en una escala lineal corriente, en la que se suman los números grande y pequeño y luego se divide entre dos para obtener la media aritmética.



¿Es el Universo abierto o cerrado? Su destino último depende de la densidad de materia en su interior, la cual resulta muy difícil de calcular. Una prueba directa de la velocidad con que la expansión del Universo está aminorando su marcha resolvería el problema de una vez por todas; esta prueba, en principio, se obtendrá comparando el desplazamiento hacia el rojo de galaxias lejanas, lo que da una medida de sus velocidades de recesión, con el brillo (o mejor, la palidez) que indica su alejamiento (nótese que por convención las magnitudes por la cuales los astrónomos miden el brillo son *mayores* para los objetos más apagados). Pero en el Universo observable, estas medidas (grupos de puntos en la figura) son inadecuadas para discriminar el margen de los valores correspondientes a un Universo abierto, destinado a expandirse indefinidamente, o a un Universo cerrado, destinado al fin a condensarse en una bola de fuego reminiscente del propio *Big Bang*. Todo lo que podemos decir es que el Universo real se halla muy cerca de la línea divisoria entre el abierto y el cerrado.

Pues bien, el tamaño de un planeta como la Tierra resulta de la media geométrica entre el tamaño del Universo y el de un átomo, y la masa de un cuerpo humano, de la media geométrica entre la masa del planeta y la de un protón. Estas relaciones *podrían* ser una pura coincidencia. Pero, por otra parte, existen muy buenas razones, basadas en los actuales valores de las fuerzas eléctricas y gravitacionales de nuestro Universo, por

las que una criatura como el hombre en nuestro planeta debe tener precisamente el tamaño que tenemos.

Suponiendo que un animal tenga éxito, en términos de evolución, y llegue a dominar el entorno, se registra por lo general una tendencia evolutiva hacia un aumento de tamaño. Los individuos de mayor envergadura de cada generación pueden obtener más alimentos o pueden tener más fácil el hallar pareja, en el supuesto de que no les molesten los depredadores y de que no crezcan tanto como para verse con dificultades a la hora de esconderse. Esta tendencia se pone de manifiesto, por ejemplo, en la manera en que las pequeñas especies de dinosaurios crecieron y se diversificaron tras a extinción de los grandes dinosaurios para dar origen a nuevas especies de mayor tamaño. A lo largo de los últimos 65 millones de años, los pequeños mamíferos se han trasladado a los nichos dejados vacíos por los dinosaurios y han crecido de modo semejante. Desde el punto de vista de un físico, sin embargo, resulta sencillo calcular cuán voluminoso puede llegar a ser un cuerpo humano conservando la capacidad de sobrevivir en nuestro planeta. Nuestros cuerpos se mantienen compactos gracias a fuerzas eléctricas, las fuerzas que enlazan los átomos para formar moléculas y permiten a éstas unirse unas a otras. La fuerza de la gravedad contrarresta estas fuerzas, y es capaz de romper cualquier conjunto de moléculas demasiado grande cuando cae; sea el conjunto de moléculas un árbol, una piedra o un ser humano, poco le importa a la fuerza de la gravedad. Si se supera cierto tamaño, seguro que se rompe cuando cae. Por consiguiente, tanto las fuerzas eléctricas que gobiernan la estructura de los átomos como las fuerzas gravitacionales que mantienen juntos a los planetas son importantes para el hombre; no ha de ser, pues, sorprendente descubrir que el hombre tiene un tamaño intermedio entre el de un átomo y el de un planeta[82].

---

[82] En caso de que el lector se sorprenda, como hice yo cuando oí por primera vez este razonamiento, el hombre es, realmente, uno de los animales más grandes sobre la Tierra en este momento. Por supuesto que no se tiene en cuenta a las ballenas, dado que el agua en que se desenvuelven las sostiene, y la torpe

Volviendo de nuevo a la escala superior, si la constante de la gravedad fuera un poco mayor de lo que es, la convección en el interior de las estrellas desaparecería y las inestabilidades que dan origen a las explosiones de las supernovas nunca se desarrollarían, ni se esparcirían, en consecuencia, elementos pesados por los espacios interestelares para formar planetas. Y así podríamos ir alargando la lista; todo lo que se refiere a nosotros puede ser interpretado de una manera muy precisa como el resultado de una "elección" exacta de las leyes físicas y de las constantes de la naturaleza. La conclusión a que llegan muchos es que un universo adecuado para la vida resulta un fenómeno de excepción. En las ecuaciones matemáticas es del todo posible variar un insignificante detalle, como el de la velocidad a la que el hidrógeno se transforma en helio en el interior de la bola de fuego, o la constante de la gravedad. Tales alteraciones producen nuevas ecuaciones que describen universos plausibles, pero, casi siempre, universos en los cuales la vida, tal como la conocemos, es irrealizable.

¿Cuál es el significado de esto? Una posibilidad es que el Universo que conocemos sea un accidente altamente improbable, "una de esas cosas que ocurren". Otra posibilidad es que todo lo que nosotros consideramos como "el Universo" no sea más que un pequeño rincón de algo mucho mayor, y que en numerosos lugares alejados de nuestro rincón se den diferentes leyes físicas sin oportunidad para la vida. La posibilidad que a mí más me satisface va un paso más allá que ésta, y es la de que exista un infinito número de universos alternativos, en cierto sentido "unos junto a otros" en el tiempo, o que se sucedan en sus ciclos vitales. No poseemos ninguna evidencia derivada de la observación que refrende o refute esta idea, y es de creer que nunca la poseeremos. Pero significaría que todo posible tipo de combinación de circunstancias físicas ocurrió en

---

marcha del elefante evidencia cómo la gravedad comienza a vencer a los animales de mayor envergadura que el hombre: el tigre y otros. Sólo hacen falta leves retoques para completar la historia más arriba esbozada: en un planeta como la Tierra, ninguna criatura *ágil* puede sobrepasar el tamaño de un hombre y continuar viviendo.

algún lugar o en algún momento. En tal situación, la vida existiría sólo para desconcentrar sobre el misterio del Universo (o universos) en aquellos lugares inusitados donde concurrieran las muy improbables condiciones necesarias para la vida. La vida debe existir, según esta definición, en un Universo muy improbable, tan intrigante como para desconcertar a la vida inteligente acerca de por qué debe existir la vida.

EL DESTINO DEL UNIVERSO

Es bastante notable que la vida sobre la Tierra haya evolucionado hasta un estado en el que somos capaces de intrigamos por semejantes cuestiones, con el Sol únicamente en la mitad de su vida como estrella estable de la secuencia principal. Faltan todavía otros 5.000 millones de años más o menos para que nuestro Sol alcance el final de su vida, dentro de la secuencia principal, y se expanda hasta transformarse en una gigante roja para tragarse los planetas interiores, y no hay razón para esperar la extinción de la vida sobre la Tierra —la muerte de Gea— antes de que esto ocurra. Sin embargo, tampoco hay razón para esperar que la vida humana sobreviva ni siquiera una fracción de ese tiempo. Podemos ser víctimas de un desastre natural —la explosión de una supernova cercana, quizá, que produzca una inundación de radiaciones y una masiva extinción de la fauna sobre la Tierra— o de nuestra propia locura. Si es así, dados los acontecimientos de los últimos 65 millones de años, Gea va a disponer de mucho tiempo para tratar de generar de nuevo un “sistema nervioso” inteligente a partir de alguna otra especie. Podemos ser muy bien la primera de muchas formas de vida inteligente que se desarrollen aquí. Por otra parte, nosotros hemos desarrollado algo nuevo en la historia de la Tierra, y podemos cambiar las circunstancias de tal manera que la historia de la evolución no va a ser la misma de nuevo. Nosotros almacenamos información fuera de nuestros propios cerebros, en libros, bibliotecas, y ahora en sistemas de computador, lo cual se sitúa más allá de la inteligencia biológica. Richard Dawkins, en *The Selfish Gene*, llega al extremo de describir

unidades de información —ideas expresadas en palabras, una canción, un libro o una obra de teatro— como "los nuevos replicadores", a los que denomina "memes":

«Así como los genes se propagan a sí mismos dentro del "patrimonio genético" saltando de cuerpo a cuerpo a través de los espermatozoides o de los óvulos, los memes se propagan en el patrimonio de memes saltando de cerebro a cerebro... si un científico escucha o lee algo sobre una buena idea, lo transmite a sus colegas y discípulos[83].»

Dawkins incluso llega a considerar la competición entre memes para lograr espacio en libros, sistemas de computador, o hasta en la memoria humana. La analogía resulta imperfecta cuando se extrema; pero pone de relieve la aparición de un factor diferente en nuestra cultura que, impidiendo una catástrofe arrasadora, puede hacer a la cultura, o a su contenido en información, más duradera que los genes de, digamos, los grandes dinosaurios. A pesar de cuanto cambiemos, o de que los computadores y los robots nos "reemplacen", como ocurre en algunos relatos de ciencia-ficción, los memes de la cultura humana —y de individuos humanos como Einstein o Shakespeare— pueden persistir. Y si en alguna ocasión establecemos contacto con especies inteligentes de otros planetas que giren alrededor de otras estrellas, los memes humanos podrán difundirse a través del Universo, aun cuando los viajes por el espacio físico interestelar resulten imposibles.

Tal vez, sin embargo, nuestros descendientes logren desarrollar una cultura espacial —si no interestelar, por lo menos interplanetaria— utilizando los recursos de todo el Sistema Solar en lugar de los de un pequeño planeta. Pero por muy optimista que se sea acerca del futuro inmediato del hombre, resulta inconcebible imaginar a la humanidad y a la sociedad humana conservando una forma reconocible durante los próximos mil millones de años, cuando tantas cosas han ocurrido durante los pasados mil millones de años. Nosotros solamente

---

[83] Richard Dawkins, *The Selfish Gene* (Londres. Oxford University Press. 1976). página 214 El gen egoísta. Salvat Editores. S.A., Barcelona.

somos visitantes temporales en una escala de tiempo universal, y el problema del destino final del Universo, mucho después de que la raza humana haya desaparecido y el Sol haya expirado, puede revestir, acaso, importancia filosófica pero, desde luego, no práctica. Pero esto no significa que la cuestión no sea interesante.

Los factores clave que determinan el destino último del Universo son la cantidad de materia que contiene y la velocidad a la cual se expande. La materia tiende a retardar la expansión por medio de la acción de la gravedad, tratando de tirar del Universo para llevarlo de nuevo al estado compacto de la bola de fuego del *Big Bang*. En términos simples, el Universo sólo se expande sin cesar si explota más velozmente que su propia “velocidad de recesión”. La velocidad de expansión —el valor de la constante de Hubble— varía a medida que el Universo evoluciona, por lo que puede antojarse difícil decidir aquí y ahora cuál va a ser el destino del Universo dentro de muchos miles de millones de años. Pero conforme se expande el Universo, su densidad decrece al dispersarse la materia en el espacio, y esta disminución de la densidad se encuentra exactamente en línea con la velocidad a la que cambia la constante de Hubble. Si la densidad de la materia del Universo visible para nosotros es suficiente para detener la expansión que ahora observamos, es que el Universo ha estado siempre expandiéndose a una velocidad menor que la de escape, y esta velocidad puede decrecer de manera eventual tanto que la expansión primero se detenga y luego se convierta en un colapso. Por otra parte, si la expansión que se registra en la actualidad progresa lo bastante rápido como para sustraerse a las “presas” gravitatorias de la materia hoy observable, entonces es que el Universo es y ha sido siempre “abierto” y estará para siempre en expansión. “Todo” lo que los astrónomos tienen que hacer es medir la densidad de la materia a través del Universo conocido y el valor actual de la constante de Hubble, que nos da la velocidad de la expansión universal. Luego serán capaces de contestamos sin ambigüedades la pregunta de si nuestro Universo es abierto y se expandirá sin límite o es cerrado y al final va a colapsarse.

Ninguna de las dos cruciales medidas es fácil; la situación no se ve aliviada por el hecho de que el Universo en que vivimos parezca ser más bien joven desde el punto de vista de su expansión. Durante el tiempo que ha transcurrido desde el *Big Bang,* el Universo ha cambiado muy rápidamente, y todavía tiene que establecerse en una serena edad media; mirando hacia atrás, a la época en que la vida surgió sobre la Tierra, la densidad de la materia en el Universo debía de ser el doble de la actual; y retrocediendo de nuevo en el tiempo aproximadamente la misma distancia en el pasado, la materia del Universo se acumulaba en un lugar en el *Big Bang*[84]. El progreso desde el *Big Bang* hasta nosotros ha sido espectacularmente rápido si lo ponemos en relación con la expansión del propio Universo, y su evolución futura se extiende durante mucho más tiempo que el que ha abarcado su historia desde el *Big Bang,* tanto si es abierto como si es cerrado.

La juventud del Universo utiliza todo un conjunto de métodos para averiguar su destino último. En principio, sería posible averiguar con qué rapidez se retarda la expansión del Universo comparando las velocidades de recesión de objetos próximos, visibles gracias a la luz recientemente emitida, y objetos lejanos, vistos cual eran cuando el Universo era joven. Esto mostraría cómo ha cambiado la constante de Hubble, y si el cambio basta para denotar que el Universo es cerrado. Esta es una idea muy brillante, y elimina el problema de medir la densidad del Universo. Sin embargo, todo lo que estas observaciones particulares pueden decimos es que la velocidad a la cual el Universo se está retardando se halla cerca del valor crítico que determina si aquél es abierto o cerrado. Debido a que el valor de este "parámetro de deceleración" está próximo al valor

[84] No decimos que el Universo tuviera, cuando la vida apareció sobre la Tierra, la mitad de su tamaño actual, ya que el Universo puede en realidad ser infinito, en cuyo caso siempre fue infinito, incluso cuando tenía una densidad muy elevada. Al decir que la densidad, hace unos miles de millones de años, era el doble de la actual, los astrónomos quieren significar que una determinada galaxia o un grupo de galaxias que ahora se ven en el espacio se encontraban muy próximas a nosotros en aquel tiempo.

crítico, se hace preciso que transcurra un período más largo de la historia del Universo antes de poder utilizar este método para decidir la cuestión en uno u otro sentido, ya que minúsculas diferencias en las medidas “aquí y ahora” y “allí y entonces” de la constante de Hubble resultan decisivas. Y no ha transcurrido todavía bastante tiempo de la historia del Universo para que las observaciones procuren una respuesta terminante.

Esto no impide a ciertos autores intentar sacarse respuestas de la manga; algunos cosmólogos argumentan que el parámetro de deceleración es conocido hoy con suficiente exactitud como para solventar la cuestión. Lloyd Motz, profesor de astronomía en la Columbia University, es un acérrimo defensor del modelo de universo cerrado, y cita las medidas del parámetro de deceleración efectuadas por el observador americano Allan Sandage como prueba concluyente que «muestra que las galaxias están retrocediendo a velocidades inferiores a la de escape. La expansión del Universo debe, al final, detenerse[85].»

Quizá sea ésta una afirmación demasiado atrevida para ser sustentada a la luz de la evidencia disponible, por lo que la mayor parte de los astrónomos están de acuerdo con la firme conclusión de Motz. Por el contrario, dirigen su atención hacia el otro método para averiguar el destino último del Universo, que depende de la medida de la velocidad de expansión (que puede determinarse de un modo razonablemente preciso), comparada con la densidad de la materia en el Universo (que resulta muy difícil de determinar).

La cantidad de materia requerida para “cerrar” el Universo por su influencia gravitatoria global es pequeña en términos de densidad, tan sólo un gramo por cada volumen cúbico de espacio de 35.000 kilómetros de lado. La materia que vemos en el Universo se halla casi toda en forma de estrellas brillantes y galaxias, aunque sabemos que existe cierta materia oscura en forma de polvo y gas, y las mejores ideas modernas sobre la constitución de las galaxias (véase el capítulo 2) sugieren que

[85] Lloyd Motz. *The Universe* (Londres: Abacus, 1977). página 57.

debe haber, por lo menos, diez veces más materia oscura asociada a cada galaxia brillante. Considerando sólo la materia brillante, los astrónomos pueden estimar la masa de cada galaxia a partir de su brillo, sabiendo que el brillo de una estrella particular depende de su masa. Sus cálculos, si proceden de este modo, indican que la densidad global es sólo de alrededor del 1 al 2% de la cantidad necesaria para cerrar el Universo. Con los nuevos conocimientos sobre la formación de las galaxias y los indicios de que todas las galaxias poseen superhalos de materia oscura, la cifra se eleva de manera alarmante a un 10 o 20% de la densidad requerida —pero esta elevación no es lo suficiente alarmante si aceptamos la evidencia que aportan los estudios del parámetro de deceleración de que el Universo es, en realidad, cerrado. Este, en forma sintética, constituye uno de los mayores problemas de la cosmología actual, el enigma de la llamada masa perdida. Problema que se presenta incluso en una escala inferior, puesto que algunos estudios sobre el movimiento de las galaxias dentro de los cúmulos muestran que las velocidades de las galaxias individuales, calculadas por el desplazamiento de Doppler, son superiores a la velocidad de recesión del cúmulo, a menos que una materia “extra” se encuentre escondida en algún lugar del cúmulo.

El consenso actual entre los astrónomos es que el Universo es abierto. El profesor Joseph Silk, de la Universidad de California en Berkeley, ha resumido este consenso muy nítidamente: «El balance de la evidencia apunta hacia un modelo abierto de universo, [aunque] existen algunos puntos débiles en los diferentes argumentos[86].» Pero tanto si el Universo es abierto como si no lo es, la cuestión en sí misma dista mucho de estar cancelada, y las discusiones continúan abiertas. Algunas de las recientes observaciones, de hecho, insinúan que todas nuestras ideas acerca de los detalles de la expansión del Universo pueden requerir una revisión, pues en los dos últimos años se ha producido una avalancha de evidencias que sugieren

[86] Véase Joseph Silk, *The Big Bang* (San Francisco: Freeman, 1980), página 309.

que el movimiento de nuestra Galaxia se desvía mucho en relación con otras galaxias según un Universo en expansión, a causa de una fuerte influencia "local" que nos arrastra hacia el cúmulo de Virgo, alejado unos 30 millones de años luz. Esta influencia local supone que debe aplicarse una corrección a todas nuestras observaciones sobre el Universo en expansión, y proporciona por lo menos un indicio de que todavía no poseemos una descripción muy definida del comportamiento del Universo a gran escala que nos permita formular predicciones seguras sobre si va a expandirse para siempre, o si un día va a colapsarse.

Si el Universo es abierto, y va a expandirse indefinidamente, toca el final de la historia. Toda estrella de toda galaxia recorrerá su ciclo vital y morirá, de modo que el panorama no es sino el de unas galaxias moribundas, en extinción, que se dispersan cada vez más por el espacio a medida que el Universo se expande. La actual y notable distinción entre las estrellas calientes, brillantes, y el frío y oscuro espacio que las separa, eventualmente se perdería, y el Universo entero alcanzará un equilibrio termodinámico en un estado de muy baja densidad; un oscuro y casi vacío Universo contendría sólo los fríos y sombríos restos de estrellas, planetas y agujeros negros.

Si, por el contrario, el Universo es cerrado, entonces la historia apenas ha comenzado. Con suficiente materia para detener la expansión e iniciar un colapso, nuestro Universo no volvería a recomenzar hasta dentro, por lo menos, de 30.000 millones de años, y tardaría otro período semejante de tiempo en alcanzar la densidad actual. Dentro de unos 90.000 millones de años, todo en el Universo, materia y energía, sería comprimido de nuevo hasta unificarlo en un punto singular, una nueva bola de fuego. ¿Y qué ocurre luego? De una manera literal, las leyes de la física, tal como hoy las conocemos, no funcionan en condiciones tan extremas, ya que "sólo" comienzan a aplicarse para describir el *Big Bang* al cabo de una fracción de segundo de la explosión. Tal vez todo desaparezca. O tal vez, la más intrigante especulación de la cosmología, se producirá un "salto" en el punto singular y el colapso se convertirá en un

nuevo *Big Bang.* Un nuevo universo en expansión renacerá, como ave fénix, de las cenizas del viejo, para recomenzar otro ciclo de expansión y colapso, con la formación de nuevas estrellas y galaxias, y planetas, algunos de ellos portadores de vida. En tal situación, puede que haya habido un infinito número de ciclos previos y que vaya a haber un número infinito de ciclos futuros, con lo cual nosotros no seríamos más que los observadores de un eslabón de una cadena continua de creación y destrucción. Para todo aquel que se sienta incómodo con el concepto de una creación singular —un único *Big Bang*—, esta idea del universo cíclico acaso sea más confortante. Pero éste no es todavía el final de la historia.

¿Serán muy semejantes a nuestro propio Universo los otros eslabones de la cadena? A primera vista, parecería que, aunque contuviesen diferentes estrellas y diferentes galaxias, habrían de ser, por lo demás, muy semejantes a nuestro propio Universo, con los mismos *tipos* de estrellas ordenadas en los mismos *tipos* de galaxias y con las mismas oportunidades para el desarrollo de la vida que en nuestro ciclo. Pero si las leyes de la física dejan de funcionar en el punto singular, ¿podemos estar seguros de que las mismas leyes de la física serán reconstruidas en el próximo *Big Bang*? John Wheeler, de la Princeton University, argumenta que tal coincidencia sería improbable en extremo. Usando un concepto conocido como “superespacio” para describir la conducta del Universo en términos matemáticos, y tomando en consideración los efectos de la mecánica cuántica, Wheeler argumenta que fluctuaciones cuánticas en la fase superdensa del colapso del Universo tanto originan el salto que desarrolla una nueva onda de expansión, como restablecen las constantes de la física de las que va a depender la específica conducta del nuevo universo en expansión[87]. Esto explicaría por qué las constantes de las leyes de la naturaleza en nuestro

---

[87] Para una descripción técnica del superespacio, la obra de consulta definitiva es *Gravitation*, de Charles Misner, Kip Thorne y John Wheeler, si bien es muy técnica.

Universo poseen valores tan curiosos (se consideran el producto de fluctuaciones cuánticas producidas durante el colapso más reciente, en el ciclo que precedió a nuestro *Big Bang).* Pero ello también sugiere que otros ciclos quizá resulten muy diferentes del nuestro y, en particular, que la vida puede ser una manifestación poco habitual de los ciclos universales.

Volvemos, de hecho, a otra forma del principio antrópico. En la mayor parte de los ciclos del Universo, las condiciones serían bastante inapropiadas para la vida (el universo podría retroceder al punto singular antes de que se formulara la vida, o las estrellas podrían no procesar el hidrógeno primordial en elementos más pesados, o no difundirlos de forma apropiada para que la vida hiciera uso de ellos). Difícilmente ningún ciclo de este universo fluctuante habría de permitir el desarrollo de la vida; nuestro ciclo se considera como uno de estos raros caprichos. Una vez más parece que el Universo que vemos a nuestro alrededor *debe* de ser de una variedad inusitada, pues de lo contrario, ¡no estaríamos aquí para reconocerlo!

Por consiguiente, se formule el problema como una secuencia de universos que se suceden unos a otros en el tiempo, o —según defienden algunos— como diferentes universos probables que se desarrollan en el tiempo, siempre volvemos a la misma conclusión sorprendente de que vida como la nuestra sólo puede existir en un tipo peculiar de universo. Fue Einstein quien observó que «lo más incomprensible de nuestro Universo es que sea comprensible»; el principio antrópico, de una forma o de otra, nos capacita tal vez para entender esta comprensibilidad (vida como la nuestra, al parecer, sólo puede existir en un Universo que comprendamos).

APÉNDICE A

LA EDAD DEL UNIVERSO

La clave de todo, en este libro, reside en la creencia de que conocemos cómo empezó el Universo, y *en la de que sabemos con cierta exactitud cuánto hace que este comienzo tuvo lugar. De modo que incluyo aquí una visión de los últimos conocimientos, los del momento en que se escribió este libro, sobre este tema tan crucial. El material apareció primero de una forma levemente distinta en* New Scientist, *el 13 de marzo de 1980. Está basado en una discusión que mantuve con el doctor David Manes, que entonces se encontraba en el Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge.*

Los astrónomos profesionales se excitaron, y el público en general se intrigó y, quizá, se engañó con el anuncio, a finales de 1979, de que la edad del Universo era sólo la mitad de lo que hasta entonces se pensaba (*New Scientist*, 22 de noviembre de 1979, pág. 587). Tres jóvenes astrónomos americanos — Marc Aaronson, del Stewart Observatory, John Huchra, de la Universidad de Harvard, y Jeremy Mould, del Kitt Peak National Observatory— redeterminaron, por medio de una nueva técnica, las distancias de varias galaxias relativamente próximas. Pensaron, como resultado de ello, que la mejor estimación de la edad del Universo se ajustaría más a los 10.000 millones de años que a los 20.000 que la comunidad astronómica ha venido aceptando durante estos últimos veinte años. Para comprender hasta qué punto las mediciones de las *distancias* de las galaxias son capaces de indicamos la edad del Universo y por qué debe haber desacuerdo sobre un factor de 2 en los resultados obtenidos mediante diferentes técnicas, hablé con David

Hanes, del Instituto de Astronomía de Cambridge. Él también ha estado trabajando en el problema de la medición de distancias galácticas y sus implicaciones para nuestros conocimientos sobre el Universo.

Hanes recalcó que las animadas y a veces acaloradas discusiones concernientes a las estimaciones de la edad (si 10 o 20 mil millones de años) han venido sucediéndose a lo largo de estas últimas dos décadas, y no fue hasta 1952 cuando los astrónomos establecieron una estimación. Fue entonces cuando los astrónomos se percataron de que su escala de distancias cósmicas estaba equivocada, no en un factor de 2, sino en uno de 4. De la noche a la mañana, la "edad de Universo" aceptada hasta entonces se cuadruplicó, un descubrimiento que acaparó la atención del público de una forma sin precedentes. La perspectiva de que los astrónomos estén obteniendo cada vez mayores estimaciones en tomo a cuándo se produjo en realidad el *Big Bang*, hace que crezca la excitación.

Un factor de 2 no es mucho cuando hablamos de edades de miles de millones de años. La diferencia entre 10 y 20 es, a todas luces, un factor de 2; pero la diferencia que hay entre 1 año y 10.000 millones de años es un factor de 10 mil millones. El "error" presente en la estimación de la edad es mucho menos relevante que el espectacular hecho de que las observaciones astronómicas sean capaces de ofrecemos una neta indicación de que hubo un comienzo definido del Universo, no importa los miles de millones de años que haga de ello.

La historia del concepto del Universo en expansión es muy breve. Tal como Hanes indica, la más significativa "edad del Universo" que tenemos es la llamada edad de expansión, y el descubrimiento de la expansión del Universo se remonta tan sólo a 1912, cuando Vesto Slipher, quien trabajaba en el Lowell Observatory, estableció por primera vez que muchos objetos no estelares —nebulosas— se alejan de nosotros a velocidades de cientos o miles de kilómetros por segundo. Velocidades más altas que las de las estrellas de nuestra Vía Láctea medidas por Doppler. Las velocidades de alejamiento fueron medidas por los desplazamientos hacia el rojo de Doppler a

partir de las características de esas nebulosas en el espectro, si bien la naturaleza de las nebulosas fue un misterio hasta 1924, cuando Edwin Hubble, con el entonces nuevo telescopio de 100 pulgadas de Mount Wilson, detectó estrellas variables cefeidas individuales en el interior de algunas de ellas. Pudo probar que están en las afueras de nuestra Vía Láctea y que forman galaxias propiamente dichas.

Hubble y Milton Humason fueron capaces de demostrar durante los años posteriores que las grandes velocidades de recesión de las galaxias externas están en relación con su brillo aparente; las menos brillantes (presumiblemente menos brillantes porque están más lejos) se alejan con mayor rapidez que las más brillantes (próximas). Esta correlación fue confirmada y perfeccionada por mediciones de las variables cefeidas en las galaxias externas más próximas (las cefeidas brillan de un modo intermitente, dando "bujías estándar" para hacer mediciones de distancias sobre las estrellas cefeidas individuales que puedan ser identificadas). Los cálculos pronto mostraron que la relación entre velocidad y distancia es lineal, y se expresa normalmente con la forma algebraica $V = H_0 d$; la velocidad de recesión (V) de una galaxia es proporcional a su distancia (d). La constante de proporcionalidad, H_0, se conoce ahora como constante de Hubble; el mismo Hubble utilizó una k en la ecuación. Este descubrimiento, combinado con el de que las ecuaciones de Einstein pueden interponerse como la descripción de un universo en expansión, fundó a la cosmología como una ciencia, e hizo posible describir cómo ha evolucionado el Universo desde su explosión inicial (el *Big Bang*) hasta llegar a su estado actual (véase *New Scientist*, vol. 83, pág. 506).

Dejando aparte las sutilidades cosmológicas y mirando lo que dichos descubrimientos nos dicen sobre la edad del Universo, es importante ignorar, principalmente, los "movimientos peculiares" a pequeña escala de las galaxias individuales que perturban el modelo de expansión del Universo. La cercana galaxia Andrómeda (M31), por ejemplo, se está aproximando a nosotros. En segundo lugar, la constante de Hubble no es, en rigor, constante de ninguna de las maneras, porque la atracción

gravitatoria de toda la materia en el Universo actúa deteniendo el alejamiento de las galaxias. La “constante” de Hubble debería decrecer con el tiempo, del mismo modo que las velocidades de expansión de las galaxias decrecen con el tiempo, y ése es el motivo por el que se da el subíndice cero para dar a entender el valor *presente* de lo que algunos meticulosos astrónomos prefieren llamar la “razón” de Hubble o el “parámetro” de Hubble. El parámetro, H_0, se expresa en unidades de km/s/Mpc, de forma que una galaxia que está a una distancia de 1 Mpc (3,26 millones de años luz, un megaparsec) se aleja a una velocidad de H_0 km/s; una galaxia a una distancia de 2 Mpc tiene el doble de velocidad de recesión; y así sucesivamente.

De modo que vivimos en un Universo en expansión. Ayudándose (aunque no muy precisa) de una analogía con una bomba que explota, Hanes compara los restos de las galaxias con la metralla de una bomba. Los fragmentos que se mueven más velozmente son los que irán a parar más lejos; por consiguiente, en un determinado momento después de la explosión las velocidades observadas de los fragmentos serán proporcionales a la distancia a que estén del lugar donde se ha producido la explosión, ignorando factores externos tales como la resistencia del aire. Esta “ley” de Hubble no tiene en cuenta qué fragmento —qué galaxia— se escoge como punto de referencia a partir del cual medir distancias y velocidades, como muestra la figura 1.

A la luz de esta analogía es fácil ver una forma de determinar la edad del Universo. Se divide la distancia a la que se encuentran dos galaxias —dos fragmentos— por su velocidad de recesión relativa, de lo que resulta el tiempo que hace que se “tocaban”, interpretándolo como el tiempo que hace que se produjo el *Big Bang.* El Universo real se está desacelerando, es evidente, de manera que la velocidad de recesión debió de ser mayor en el pasado; este simple cálculo debe damos una edad aproximada del Universo, el tiempo que hace que se produjo el *Big Bang.* Pero una estimación consistente bastaría para satisfacer a los cosmólogos actuales. En términos de la constante de

Hubble, H_0, esta estimación de la edad del Universo, denominada “edad de expansión” o “tiempo de Hubble”, viene dada por $t = d/V = 1/H_0$.

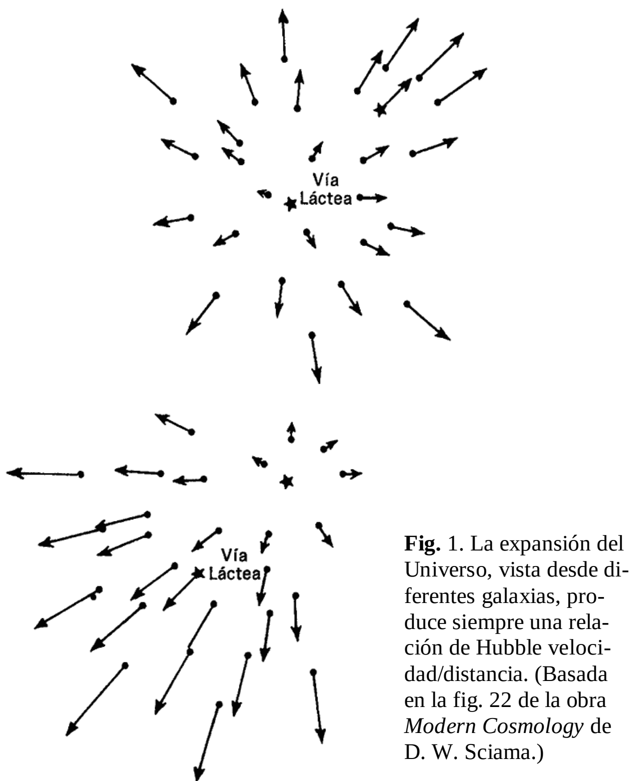


Fig. 1. La expansión del Universo, vista desde diferentes galaxias, produce siempre una relación de Hubble velocidad/distancia. (Basada en la fig. 22 de la obra *Modern Cosmology* de D. W. Sciama.)

Pese a que Hubble era muy consciente de todo ello, y pese a que disponía de una buena herramienta para medir las velocidades de las galaxias, como eran los desplazamientos hacia el rojo, era bastante más difícil medir las distancias de otras galaxias de una forma precisa. Además, puesto que las galaxias más próximas tienen velocidades peculiares que no encajan en el modelo de expansión, las estimaciones de la edad dependen de mediciones, tan precisas como sea posible, de las distancias

de galaxias de al menos decenas de millones de años luz de distancia. Durante medio siglo, las distancias estimadas han representado el eslabón flojo de la cadena, y sus cambios en la escala de distancias nos han conducido en ocasiones a cambios drásticos en nuestras estimaciones de la edad del Universo. Hubble y Humason, pioneros en este trabajo, empezaron con una estimación de 2.000 millones de años para la edad de expansión, embarazosamente corta, por cuanto los estudios geológicos indican una edad superior de la Tierra, y nadie se encontraba satisfecho con la idea de que el Universo fuera más joven que nuestro planeta. El dilema se resolvió en 1952, cuando se descubrió, con ayuda de las siempre provechosas observaciones, que Hubble confundió una clase de estrella variable con otra, y que, en algunas remotas galaxias superbrillantes, algunas nubes de gas ionizado fueron equivocadamente identificadas como estrellas. El resultado fue que se cuadruplicaron las estimaciones de la escala de distancias extragalácticas, lo que retrotrajo la edad de expansión a 8.000 millones de años, edad superior a la del Sistema Solar (que se estima en 4.500 millones de años según diversas evidencias). Desde entonces, ulteriores perfeccionamientos de la escala de las distancias cósmicas han tendido a establecer la edad definitiva en unos 20.000 millones de años, tendencia que ahora contradice el trabajo de Aaronson, Huchra y Mould, así como los estudios por completo independientes realizados por Hanes, utilizando una nueva técnica, poco conocida pero impresionante.

Hanes ha afrontado el problema mediante el estudio del brillo de cúmulos globulares de estrellas en galaxias distantes. Los cúmulos son en potencia excelentes indicadores de distancias cósmicas, por la razón de que contienen una gran cantidad de estrellas y son, por ello, muy brillantes y visibles aun a grandes distancias. Tal como el nombre indica, los cúmulos globulares son esféricos; pueden llegar a contener un millón de estrellas en cada cúmulo, y el brillo de cada una de esas estrellas es comparable con el de nuestro Sol. Más de cien de esos cúmulos son visibles alrededor de nuestra propia Galaxia, y pueden ser identificados hasta los de Virgo, a más de diez millones de años luz.

Si todos los cúmulos globulares tuvieran el mismo brillo, las distancias intergalácticas podrían determinarse con sólo la medición de su brillo aparente, que sería calculado con la ley del inverso del cuadrado, que dice que una "bujía estándar" a una distancia de *2x* de nosotros aparecerá con un brillo equivalente a un cuarto del brillo de una bujía estándar a una distancia de *x*. Desgraciadamente, los cúmulos globulares no son todos idénticos. Dentro de nuestra propia Galaxia, los cúmulos más brillantes son cien veces más luminosos que la más débil de las que conocemos, y una ingenua comparación entre dos cúmulos globulares escogidos al azar y en distintas galaxias nos dispensaría información engañosa sobre las distancias relativas entre dichas galaxias y nosotros.

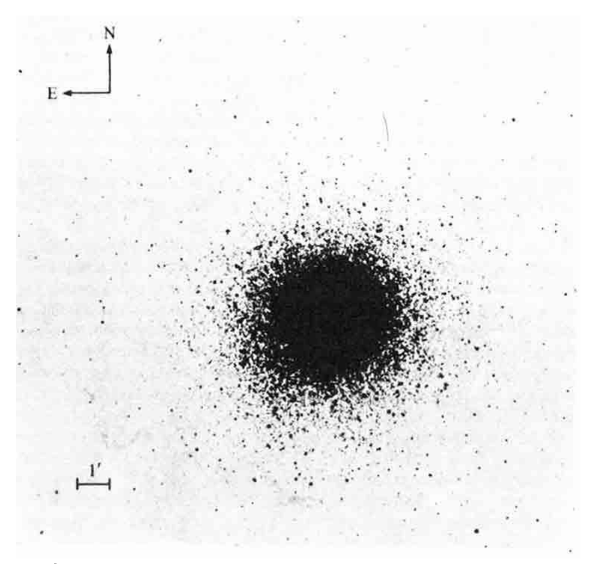


Fig. 2. Cúmulo globular de nuestra Galaxia, disgregado en estrellas individuales; las galaxias de la constelación de Virgo se hallan rodeadas de millares de cúmulos globulares que no pueden disgregarse en estrellas separadas.

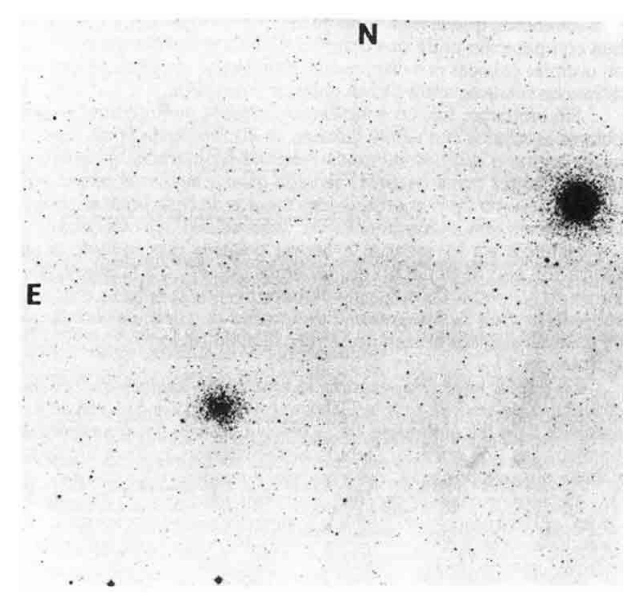


Fig. 3. Dos cúmulos globulares de nuestra Galaxia. Ambos se hallan aproximadamente a la misma distancia de nosotros, de manera que la diferencia en el brillo aparente, visible en la fotografía, es real.

Sin embargo, tras un concienzudo estudio de los cúmulos globulares asociados con veinte galaxias en el cúmulo de Virgo, Hanes ha encontrado que los números relativos de cúmulos globulares, tanto brillantes como oscuros, de cada galaxia siguen el mismo esquema. Cuando los números de los cúmulos de cada brillo se muestran gráficamente, como “función de luminosidad”, se obtienen curvas idénticas en lo esencial a las de galaxias que, debido a su asociación con otras del grupo, sabemos que están a la misma distancia de nosotros. Cuando este descubrimiento se aplica a estudios sobre la función de luminosidad de familias de cúmulos globulares de galaxias elegidas al azar, nos ofrece una indicación inequívoca de la distancia.

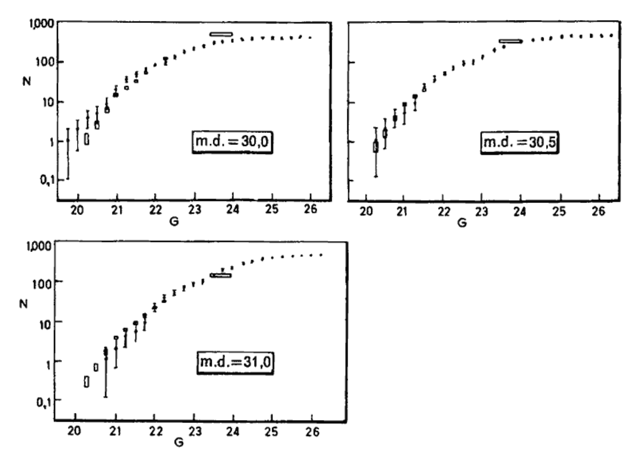


Fig. 4. Comparaciones de la función luminosidad de cúmulos globulares en las cinco galaxias de Virgo (cuadrados) y en nuestra propia Galaxia (puntos) con las correcciones apropiadas para desplazar los cúmulos de nuestra Galaxia a diferentes módulos de distancia. La sensibilidad de esta técnica, en cuanto indicador de distancias, se halla expresada con claridad; de hecho, el mejor ajuste se obtiene para un módulo de distancia de 30,7 magnitudes.

En primer lugar, Hanes toma la función de luminosidad de los globulares de nuestra propia Galaxia; luego toma la función de luminosidad de los globulares de la galaxia en estudio, y finalmente compara los dos gráficos. Debido al debilitamiento de la luz de la galaxia distante por la ley del inverso del cuadrado, las dos funciones de luminosidad no se nos muestran idénticas en su estado “puro”. Ahora bien, si se modifica la función que corresponde a los globulares de nuestra Galaxia por medio de una apropiada disminución del inverso del cuadrado, las dos curvas pueden hacerse coincidir de forma exacta. La distancia única que se corresponde con el ajuste de luminosidad requerido nos da la distancia que hay hasta la otra galaxia (fig. 4). Los astrónomos miden el brillo de los objetos celestes en “magnitudes”, de modo que una distancia determinada por este método se da en magnitudes, como “módulos de distancia”. Utilizando los datos del cúmulo de Virgo, Hanes sugirió

un módulo de distancia de 30,7 mag, que se correspondía con una edad de expansión del Universo de 12,5 mil millones de años, y con una constante de Hubble de 80 km/s/Mpc (10.000 millones de años corresponden a H_0 = 100 km/s/Mpc; 20.000 millones de años, a H = 50 km/s/Mpc). Estos resultados fueron publicados en 1979 en el *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (vol. 188, pág. 901); otras técnicas, incluyendo un montón de evidencias reunidas y analizadas por Allan Sandage y Gustav Tammann en los Hale Observatories, todavía apuntan hacia la edad de 20.000 millones de años, mientras que un reducido número de otras pruebas da unos resultados más similares a las estimaciones de Hanes. Aunque es la mayor edad de expansión la más probable, es evidente que no hay acuerdo entre los astrónomos actuales; Hanes dice que «cada método tiene sus méritos y sus problemas, sus adeptos y sus detractores». No obstante, para alguien que asiste al debate desde fuera, una cosa sí está clara: en tanto que el método "normal" utilizado por Sandage, Tammann y otros consiste en reunir varias (o muchas) evidencias, el método de los cúmulos globulares utiliza un solo tipo de observación de una clase de objetos astronómicos. Hay intrínsecamente menos error con este último método, pues cuanto más larga es la cadena de razonamiento mayor es la posibilidad de equivocación. Aaronson, Huchra y Mould utilizaron también la técnica de un solo paso, pero una técnica que les permitió investigar más lejos dentro del Universo, más allá de la distancia a la que los cúmulos globulares individuales pueden ser escogidos (con todo, su técnica no cubría una porción de espacio de verdad extensa, en razón del Universo visible; las distancias de las más remotas galaxias pueden determinarse *únicamente* midiendo los desplazamientos hacia el rojo y usando la mejor estimación de H_0 en la relación de Hubble velocidad/distancia).

Básicamente, su técnica consistía en un hecho muy simple: las galaxias con más masa contienen más estrellas y son, por tanto, más brillantes que las de menos masa. Si la *masa* de una galaxia se determina, y conocemos el brillo medio de una es-

trella, entonces podemos estimar su luminosidad absoluta y determinar su distancia a partir de su luminosidad aparente y de la ya familiar ley del inverso del cuadrado. La masa se estima midiendo la proporción en la cual la galaxia escogida se mueve, ya que los sistemas con más masa se mueven más rápidamente para evitar colapsarse por culpa de su propio empuje gravitatorio. En el caso de galaxias uniformes vistas de canto, es sencillo medir la rotación porque los desplazamientos de Doppler en el espectro tomados en los dos extremos de la galaxia dan una indicación directa de la velocidad a la que uno de los lados se aproxima a nosotros y a la que el otro se aleja (asumiendo, por supuesto, que se resta todo el desplazamiento hacia el rojo causado por la expansión del Universo). Puesto que las galaxias son ricas en gas de hidrógeno neutro, Aaronson, Huchra y Mould utilizaron una radiación de 21 cm de dicho gas para medir los índices de rotación, en vez de emplear un espectro óptico, si bien el principio es el mismo.

Hasta aquí todo es correcto, aunque todavía es necesario medir la luminosidad, y esto acarrea problemas. Brent Tully y Richard Fisher, que fueron los pioneros en esta técnica, siempre medían la luminosidad con una luz azul, pero esas cortas longitudes de onda eran dispersadas con facilidad por granos de polvo (a la manera en que la luz azul es dispersada por el polvo en la atmósfera, para originar una puesta de sol roja), y como el polvo se concentra en el plano de una galaxia, esta dispersión es particularmente importante en el caso de la luz procedente de una galaxia vista de canto. Si se estudian las galaxias de cara para eludir dicho problema, resulta mucho más difícil medir los índices de rotación (la observación directa de la rotación requeriría miles de años, ya que una galaxia como la nuestra tarda cientos de millones de años en dar la vuelta). Así pues, los primeros intentos de utilizar la técnica Tully-Fisher se saldaron con muy distintos resultados, que dependían de las suposiciones que se hicieran sobre la absorción y de lo grande que fuera la corrección aplicada para los efectos de inclinación.

Aaronson, Huchra y Mould (AHM) han intentado superar esas dificultades midiendo el brillo por medio de longitudes de onda de infrarrojos, que penetran a través del polvo con más facilidad. Esto tiene la ventaja de que la mayor parte de la masa de una galaxia comparece en forma de estrellas frías, rojas y de baja luminosidad, de manera que las observaciones infrarrojas están más cerca de la banda de onda donde la masa dominante es más visible. (Naturalmente, toda esta discusión se aplica a las galaxias visibles y brillantes; cobran su peso creciente las evidencias de que mucha masa puede estar fuera de la región brillante, en forma de materia oscura; *New Scientist*, 8 de noviembre de 1979, vol. 85, pág. 436.) Calibrando sus cálculos a la vez que estudiaban en primer lugar unas cuantas galaxias cercanas cuyas distancias se determinan con mucha exactitud gracias a las mediciones de las variables cefeidas, AHM fijaron entonces su atención en el exterior para descubrir las sorpresas que tuvieron lugar a finales de 1979.

Hanes no se sorprendió por los resultados del estudio de AHM sobre el cúmulo de Virgo —un vecino relativamente próximo, a escala universal— cuando los cálculos indicaron una distancia a ese cúmulo sólo un 14% mayor que la distancia determinada por el método de los cúmulos globulares, de acuerdo con las incertidumbres de las dos técnicas. Pero debido a que la técnica AHM utiliza la luz de las galaxias enteras, a diferencia de la de Hanes, que utiliza la luz de los cúmulos de las galaxias, puede explorar más lejos, lo cual revela que la constante de Hubble determinada por los estudios sobre Virgo es menor que la constante de Hubble determinada a través de las galaxias más lejanas. Es este descubrimiento, más que la baja edad de expansión que implica, el que ha despertado más interés "en el gremio", entre los astrónomos. Otras mediciones han indicado que nuestra propia Galaxia y sus vecinas más próximas pueden estar acercándose al cúmulo de Virgo a varios cientos de kilómetros por segundo (véase *New Scientist*, 31 de enero de 1980, pág. 317), y parece cada vez más como si nuestra Galaxia tuviera dicho gran "movimiento peculiar" que revelan las mediciones más exactas sobre la edad del Universo y

las conclusiones sobre su evolución y que se requerirán unos mapas a gran escala de distancias mucho mayores que las utilizadas hasta ahora.

La edad de expansión derivada por AHM es de unos 10.000 millones de años, lo que la pone al borde de resultar incómodamente corta. Nuestros mejores modelos teóricos de evolución estelar sugieren que las estrellas de los cúmulos globulares, las más viejas de las estrellas conocidas, tienen justamente esa edad o quizá más. Hanes señala que es posible que tenga que efectuarse un replanteamiento básico de la evolución estelar si siguen apareciendo más evidencias de tan corta edad de expansión. No obstante, todavía no ha llegado el momento de hacerlo, y hasta que no se reduzcan las divergencias entre los resultados de los cálculos obtenidos con diferentes técnicas (la estimación de Sandage-Tammann de 20.000 millones de años todavía tiene sus adeptos) nada puede ser tomado como evangelio.

Un cálculo del todo independiente y, en principio, poco ambiguo de la edad del Universo nos lo dispensan los estudios de los productos deteriorados de isótopos radiactivos encontrados en material antiguo, como los meteoritos. Hasta ahora, sin embargo, las incertidumbres relacionadas con la aplicación práctica de esta técnica significan que la correspondiente mejor estimación de la edad del Universo está entre 13.000 y 22.000 millones de años *(New Scientist*, 7 de febrero de 1980, pág. 398). Esto puede inducir a considerar que la estimación AHM es más bien baja, pero todavía se da una divergencia demasiado grande como para resolver el tremendo conflicto entre los resultados de AHM y de Hanes y los de Sandage, Tammann y sus colegas.

La simplicidad de los estudios tanto de AHM como de Hanes sugiere que deberán contener escasos errores, y el acuerdo entre las dos técnicas simples es tranquilizador. La cuestión más fascinante que se ha lanzado a través de todo ese trabajo, por tanto, es: ¿hasta qué punto del Universo hemos de llegar para que los efectos universales dominen sobre el comportamiento “local” en cuanto al movimiento de nuestra Galaxia, a

cientos de kilómetros por segundo, hacia un vecino como el cúmulo de Virgo, que se halla a unos 30 millones de años-luz de nosotros?

APÉNDICE B

CRECIMIENTO Y LÍMITES

En el futuro inmediato, el mayor problema con que se enfrentará la humanidad será el de eliminar las desigualdades que causan los conflictos entre los pueblos. Son tantas las personas condicionadas en la actualidad por la ya desacreditada teoría de los "límites del crecimiento" de ¡a década anterior, que incluyo aquí otro artículo mío, ligeramente modificado, que se publicó en New Scientist *coincidiendo con el final de la década de los setenta, y que coloca el debate de los "límites" en perspectiva.*

A pesar de que algunos pedantes puedan argumentar que 1980 es el último año de la década antigua y no el primero de la nueva, la mirada a la bola de cristal que, por regla general, se efectúa en esta época del año recibe un estímulo extra en razón del cambio no de uno sino de dos dígitos en el calendario. Exactamente lo mismo ocurrió hace diez años, cuando nos encontrábamos inmersos en pronósticos sobre el día del Juicio final que pretendían que la civilización tal como la conocemos tendría suerte si sobrevivía hasta los años ochenta, y no digamos ya si llegaba hasta el nuevo milenio. El obvio fracaso de las previsiones de las postrimerías de los años sesenta aconseja que mejor será tomar los actuales pronósticos con ciertas reservas. Hay una moda de historias sobre un futuro plagado de microchips, desempleo para las masas y una vida regalada para los ricos. Pero, ¿está esto más cerca de la verdad de lo que lo estaba el pesimismo de 1969?

Hace diez años, en su discurso de apertura de la conferencia que inauguraba la segunda década de desarrollo de las Naciones Unidas, U Thant, entonces secretario general de las Naciones Unidas, hizo la siguiente declaración:

«No quiero parecer dramático, pero no puedo dejar de pensar, por la información de que dispongo como secretario general, que los miembros de las Naciones Unidas tienen quizá solamente diez años para olvidar sus antiguas disputas e iniciar un periodo de colaboración global para poner freno a la carrera armamentista, mejorar el medio ambiente humano, detener la explosión demográfica y renovar el ímpetu de los esfuerzos para el desarrollo. Si tal colaboración no se verifica dentro de la próxima década, me temo mucho que entonces los problemas que he mencionado habrán alcanzado unas proporciones tan gigantescas que escaparán a nuestro control.»

Bien, ya estamos en la década siguiente, y esa catastrófica predicción, como tantas otras, se ha revelado inexacta. Todavía nos tambaleamos entre crisis y crisis, y hay quien sigue pronosticando el desplome de la civilización en los "próximos" diez años. En el otro extremo, unos cuantos superoptimistas predicen que, si podemos resistir durante unos pocos años más, la tecnología nos hará entrar en una era de abundancia en alas de una gran explosión de crecimiento, y ésos también decían lo mismo hace diez años. Pero a despecho de la aparente amplia diferencia entre los profetas de la explosión y los profetas de la catástrofe, los futurólogos han coincidido mucho durante los últimos diez años, lejos de sus atrincheradas y separadas posiciones en los extremos.

Fue el primer informe notorio del Club de Roma, *Los límites del crecimiento*, el que hizo llegar con tintes dramáticos hasta la opinión pública, a principios de los años setenta, el debate sobre el futuro. Pero históricamente fueron Herman Kahn y su equipo del Instituto Hudson los primeros de la moderna generación de futurólogos en obtener repercusión en los círculos académicos y gubernamentales, con ideas diametralmente opuestas a las del equipo de los *Límites*. La visión de Kahn de

que los buenos tiempos se hallan a la vuelta de la esquina surgió en 1967 en el libro *The Year2000* (Nueva York; Macmillan), donde hacía hincapié en que el crecimiento «se desarrollaría de un modo más o menos moderado durante los próximos treinta años y siguientes». En el mundo del año 2000 descrito (suponiendo que no estalle una atroz guerra nuclear), todos los países serían ricos, aunque algunos se enriquecerían con más rapidez que otros; el mundo de 1967 demandaba con fuerza: ¡más hamburguesas!, ¡más coches veloces!, ¡más luces de neón!, ¡más TV en color!, etc.

El libro parece calculado para infundir en el lector la confianza en la creencia de que este desarrollo del mundo por la senda de la abundancia de "Occidente" es inevitable, y algunos futurólogos han señalado que *The Year 2000* era un ejercicio de propaganda, un intento deliberado de conducir al mundo en esa dirección por medio de la influencia sobre la opinión pública. No hay duda de que el libro y sus proyecciones se tomaron con seriedad, ni de que influyó en la política tanto de los gobiernos como de las grandes empresas de los Estados Unidos. Los peligros son obvios: presentando una visión del mundo del futuro, un "mundo futuro" inevitable, puede *llegar a ser* inevitable en la medida en que empecemos a actuar de conformidad con el plan. De manera que quizás esté bien que los extremistas opositores del campo catastrofista, en el debate sobre el futuro, vengan a sacudir el esquema kahniano.

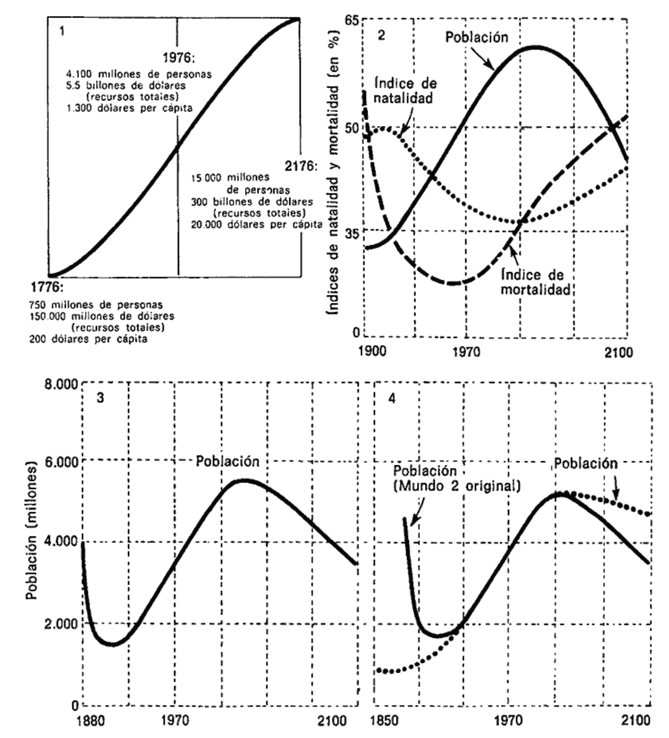
Aún en 1977, no obstante, cuando acontecimientos coyuntura- les hicieron que *The Year 2000* pareciera un tanto inconsistente como mirada a la bola de cristal, el equipo de Kahn apareció con una nueva contribución en el marco del bicentenario de los Estados Unidos, un libro titulado *The Next 200 Years*. Pero sucedió algo curioso. A pesar de que este último libro resulta mucho menos extremista, con comentarios detallados muy próximos a lo que el común de la gente consideraría como sensato, Kahn se las ha ingeniado para mantener su imagen de arcipreste de lo sensacional. Y mientras un movimiento similar ha hecho que los catastrofistas —por ejemplo, los trabajadores del Club de Roma— se apartaran de su pesimismo

extremo pasando a un terreno intermedio, sus discípulos han fracasado en el momento de encontrar un cambio. El resultado es que la juventud de ambos lados del debate (y de ambos sexos) continúa lanzándose hirientes palabras sin percatarse de lo cerca que están sus respectivos gurús de hablar el mismo lenguaje.

Sólo un catastrofista extremo, con toda seguridad, podría aceptar ahora un comentario como el siguiente:

«Desde nuestro punto de vista, la aplicación de una módica cantidad de inteligencia y una buena dirección para enfrentarse a los problemas actuales puede posibilitar que el crecimiento económico continúe durante un considerable período de tiempo, en beneficio, más que en perjuicio, de la humanidad. Argumentamos que sin tal crecimiento, las diferencias entre naciones, tan lamentadas en la actualidad, probablemente nunca serán superadas, que el "no crecimiento" condenará a los pobres a la pobreza indefinida... No esperamos que el crecimiento continúe indefinidamente... Nuestras diferencias con aquellos que abogan por unos límites del crecimiento tienen que ver menos con la credibilidad de este cambio que con sus razones.»

"Sus razones" se adelantan en *The Next 200 Years*, las cuales giran en tomo a la urgencia de que ahora ya estamos atravesando una magna transición en la historia de la humanidad, a continuación de la Revolución industrial "que empezó en Holanda e Inglaterra hace unos 200 años". No un crecimiento exponencial, sino un crecimiento que dibuja una achatada curva en S a través de una transición demográfica, es el esquema favorecido por el Instituto Hudson, cambio que al principio imita el crecimiento exponencial, pero que luego se estabiliza, una vez la repercusión de los cambios revolucionarios se ha introducido en el sistema. El crecimiento exponencial, como el equipo de Kahn pone de manifiesto, «parece, de hecho, que se está deteniendo, y no por razones que tengan que ver con desesperantes limitaciones físicas al crecimiento» (fig. 1).



La transición demográfica parece ocurrir en cada país donde el bienestar ha aumentado, la esperanza de vida ha crecido y la calidad de vida ha mejorado. La transición ha tenido lugar de una forma más rápida en aquellos países que han seguido el camino marcado por el Reino Unido y Europa. En Europa occidental y los Estados Unidos el cambio necesitó 150 años; en la Unión Soviética, 40; y en Japón, un caso reciente, sólo 25 años, desde 1935 hasta 1960.

Al margen de esta reciente contribución al debate sobre el futuro, y a menudo también al margen de las recientes contribuciones de la escuela de los "límites", la gran masa de gente que abriga algún vago temor por el modo en que las cosas están sucediendo, basan sus criterios en el mismo *The Limits to*

Growth, o en informes de segunda mano sobre el libro. Lo mejor de este libro (Potomac Associates, 1972) es que inició una ola de debates sobre el futuro y la naturaleza de los problemas con que se enfrenta la humanidad. Pero no fue ni la primera de las principales contribuciones de los modernos catastrofistas, ni la última palabra; las cosas han cambiado desde 1972, y el "debate sobre el futuro" no es el mismo que el "debate de los límites".

Si alguien debe ser considerado como el padre de la idea de la ecocatástrofe en su forma moderna, éstos deben ser Anne y Paul Ehrlich, quienes argumentaron, en diversos libros editados entre 1970 y 1971, que el mundo estaba ya entonces *justo* "a tope" en términos de población y destrucción de recursos. Lejos de sugerir más crecimiento, presentaron un panorama en el que los ricos, con urgencia, debían entregar sus riquezas sobrantes a los pobres en la esperanza de una última redención, siguiendo la vía del "des-desarrollo". La base para un cambio tan drástico puede provocar otro cambio en las actitudes morales de la índole que suele asociarse con las conversiones religiosas, «arrepiéntase, el fin del mundo está cerca». Y si no se produce ese cambio, ven un mundo futuro devorado por el hombre, las plagas y la guerra nuclear.

Extrañamente, junto a esa visión moralista, los Ehrlich también afirman que las cosas están en un punto tan desesperado que las paciones más pobres quieren algo más que ayuda, y predican la doctrina de la "selección", una bonita palabra que evita tener que decir que naciones enteras no se bastan con la ayuda y se las abandona al sufrimiento. Éste es en verdad el consejo de la desesperación; pero otros del lado catastrofista, si no los Ehrlich, hace poco han sido capaces de discernir, si bien con vaguedad, la posibilidad de un mundo futuro agradable a pesar de todos nuestros problemas.

Antes de que todo ese proceso moderador se produjera, los profetas del desastre tuvieron un día de reunión, gracias a la entrada en escena de la creación de computadoras. A principios de los años setenta, la gente estaba preparada para que se le dijera que el desastre era inminente, y estaba del mismo modo

preparada para aceptar —como si ello fuera sabia doctrina— cualquier cálculo que se hubiera realizado por medio de la computadora electrónica. Quizás a finales de los ochenta no nos fiaremos tanto. Lo que sale de la computadora depende de lo que uno introduzca dentro; la frase *garbage in, garbage out* (“basura dentro, basura fuera”) lo resume todo, pues G.I.G.O. puede muy bien sustituir “desastre dentro, desastre fuera”. De modo que las previsiones de los *Límites* fueron adoptadas por muchos periódicos y por los no especialistas como lo autorizado y bendecido por la sagrada computadora, sin pararse a pensar nunca qué es lo que se le ha introducido para que dé tal resultado. Es como si usted recibiera una carta del banco en la que se le comunica que tiene una deuda de un millón de dólares y usted lo aceptara sin preguntar cómo se ha llegado a semejante cifra. Y aquí radica *precisamente* el error.

La importancia del trabajo de Jay Forrester, que fue el primero en elaborar programas para computadoras, y el del equipo de Dennis Meadows, que los utilizó de manera profusa, nos ofrecen una forma directa de ver cómo las previsiones pueden verse afectadas por cambios en los supuestos que se introducen en el modelo.

Tomemos un ejemplo curioso. Mientras que los pronósticos descritos en *The Limits to Growth* daban una vida corta a la explosión a la que seguía el desplome, el crecimiento económico y demográfico durante la explosión ha sido más rápido que el que aseguraban los pronósticos “optimistas” del equipo de Kahn. ¿Y cómo pueden las implicaciones de la desigualdad global —incluso las desesperadas implicaciones de los Ehrlich— tenerse en cuenta en un modelo que utiliza medias globales (para el crecimiento, la contaminación, la población, etc.)? El mejor método para demostrar la verdadera efectividad de las computadoras es modificar algunas de las reglas introducidas y ver qué nuevas predicciones salen, y no es sino esto lo que hizo un equipo del Science Policy Research Unit (SPRU) de la Universidad de Sussex *(Thinking about the Future*, editado por H. S. D. Colé, Chatio y Windus, 1973).

El punto de partida de este estudio fue un modelo de Forrester y Meadows llamado “Mundo 2”, que produce la curva que se muestra en la figura 2, la representación de la dramática explosión y el desplome que, durante los pasados siete años, ha puesto color a los debates sobre el futuro. Está claro que hay que hacer arrancar el modelo de algún dato que, como el índice de natalidad, el índice de mortalidad o el crecimiento económico, resulte bien conocido; entonces, haga algunas suposiciones sobre cómo la tecnología, la contaminación y otros factores afectan al crecimiento, y ponga la cosa en marcha. El equipo de los *Límites* inició su andadura hacia 1900, un buen número redondo, y publicó curvas que hizo coincidir con la historia conocida hasta 1970, y continuar luego hasta el futuro más inmediato, todo ello a pesar de que las figuras sobre el índice de mortalidad sean un poco anteriores a 1900. Uno de los encantos de esta clase de modelos es que pueden recorrerse hacia atrás además de hacia delante, y, en efecto, una clásica prueba de su validez es recorrer el modelo hacia atrás y hacia delante varias veces entre las mismas fechas, lo que debe producir siempre las mismas curvas. Así pues, ¿qué pasa cuando recorremos el modelo Mundo 2, que dio impulso a la publicidad del debate de los límites en los años setenta, al revés desde 1900?

Los resultados (fig. 3) son curiosos, es lo mínimo que cabe decir. Siguiendo el modelo al revés desde 1900 y luego hacia delante pasando por 1900, por el momento actual y siguiendo hacia el futuro, es imposible obtener unas curvas que concuerden con todos los pronósticos de los “límites” catastróficos. Pero el mundo del siglo XX resulta ser, según el modelo, una consecuencia del dramático ciclo explosión/desplome del siglo XIX, durante el cual la población mundial alcanzó su punto máximo antes de 1880, a un nivel superior al de la figura de 1970, y luego se hundió. La catástrofe que conlleva es tan dramática, que el modelo ya no puede recorrerse al revés —en lo que al Mundo 2 le concierne, el mundo *empezó* en 1880 con una inmensa población—, hay una discontinuidad que imposibilita que el modelo sea aplicado a las primeras décadas.

Ésta es, precisamente, la clase de modelo que nos indica la necesidad de ajustar las reglas por las cuales funciona, para que lo haga en consonancia con la realidad. Todo lo que el equipo SPRU hizo fue modificar la suposición de Forrester que altera los índices de causas de mortalidad en la media mundial que varían por un factor de 6, por su propia *suposición*, que era sólo de un factor 3 en la ecuación adecuada al modelo; y con este único cambio puede recorrerse llanamente hacia atrás hasta principios del siglo XIX. Las nuevas curvas (fig. 4) guardan un parecido más próximo con la historia real que el Mundo 2 original, y ahora, aunque la población sigue descendiendo en el siglo XXI, la *razón* del descenso descansa en una caída en el índice de natalidad, no en un incremento en el índice de mortalidad.

Muchos otros supuestos introducidos en el modelo por Forrester y otros pueden ajustarse con los mismos dramáticos efectos. Altere las estimaciones sobre la productividad agrícola, por ejemplo, y habrá alterado provisiones de alimentos, población y, en definitiva, todo en el modelo. Ello no pronostica el futuro, pero ayuda a esbozar un panorama de los posibles mundos futuros. Hacia cuál de ellos vamos depende de cómo usemos lo que aprendemos de los modelos para modificar nuestras acciones, dirigiendo nuestra atención hacia los problemas más urgentes. El modelo, de hecho, nos enseña con toda claridad que tenemos una posibilidad de mundos futuros que dependen de nuestras acciones; pero haciendo creer a la gente que ya es demasiado tarde para hacer nada, los programa- dores del modelo pueden conseguir que el desastre sea inevitable.

El cambio de posiciones del equipo mismo de Meadows parece reflejarlo así. En *The Limits to Growth, se* dijo a los lectores que todas las conclusiones habían sido corroboradas por un minucioso trabajo que más tarde se convertiría en un informe técnico. En una curiosa inversión de lo que suele suceder, la popularización *(Límites)* apareció en primer lugar, sin estar respaldada por una exposición escrupulosa e inmediatamente asequible. Tantas afirmaciones carentes de ambigüedad en *Límites,* como «los límites del crecimiento en este planeta

se alcanzarán durante los próximos cien años» y «el modo de comportamiento básico del sistema mundial (es el mismo) incluso si asumimos cualquier cantidad de cambios tecnológicos en el sistema», constituyeron la piedra angular del movimiento populista basado en el trabajo de *Límites.* Cuando el informe técnico se hizo asequible, con escasa publicidad y menos lectores, contenía afirmaciones mucho más prudentes, tales como: «Como los movimientos presentados demuestran, es posible escoger un grupo de parámetros que permita que el crecimiento del material, el capital y la población continúe hasta el año 2100.»

Intente decirle a un rabioso *eco-nut* que esta afirmación procede del equipo de Meadows, después de *Límites,* y vea quién es tachado de mentiroso. Los discípulos aún creen, como una cuestión de fe, que «los límites del crecimiento... se alcanzarán en los próximos cien años».

Poca gente advirtió que todo el debate sobre el futuro, desde 1965 hasta 1975, fue una puesta en escena del trabajo principal. Los extremistas establecieron sus posiciones, moviéndose levemente, como los boxeadores cuando luchan uno contra otro y luego empiezan a golpearse. El Mundo 2 y otros modelos fueron reconocidos por los que los usaron (si bien no, ¡lástima!, por sus discípulos) como los primeros intentos de elaborar programas para computadoras de hacia dónde se dirige el mundo. La segunda generación de modelos empieza ahora a tener en cuenta las diferencias regionales; y donde el modelo Forrester original tenía 40 ecuaciones (¡para describir el mundo entero!) y la versión de Meadows 200, hoy día los programadores de modelos hablan de 100.000 ecuaciones para describir todo el sistema mundial. Evidentemente, si uno introduce desastres, obtiene desastres, y si uno introduce optimismo, obtiene Optimismo. Pero uno puede empezar a poner en acción juegos distintos y aprender cosas diferentes sobre el sistema mundial.

La mayor amenaza para la estabilidad global es la desigualdad entre los que tienen y los que no tienen. *Necesitamos* crecimiento, al menos el suficiente para que los pobres puedan disminuir la diferencia, puesto que nadie cree de veras que los

ricos vayan a renunciar a algo, y la continuación de la desigualdad nos va a abocar tanto a desastres naturales (hambre, plagas) como a conflictos armados. Los problemas están en dirigir el crecimiento de un modo adecuado para ayudar a los pobres a que salgan de la trampa de la pobreza y a través de la transición demográfica. Sólo entonces se hará viable cualquier tipo de mirada optimista al futuro.



¿Cuáles son nuestros orígenes? La ciencia ha conseguido uno de sus mayores logros al poder ahora intentar dar una respuesta a tan primordial pregunta. Con sorprendente claridad J. Gribbin describe los recientes adelantos en física y biología que arrojan nueva y, a veces, sobrecogedora luz sobre los orígenes del hombre dentro del marco del Universo en desarrollo.
El autor inicia su "historia cósmica" hace quince mil millones de años, segundos después del *Big bang* y nos va guiando a través de grandes extensiones de tiempo y espacio hasta la vida actual en la Tierra. Demuestra que somos productos del Universo en que vivimos, y plantea lo que esto significa, tanto en cuanto a las posibilidades de encontrar vida inteligente fuera de nuestro planeta, como en cuanto al destino final del hombre.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria "Science report" de *The Times*. Ha escrito muchos libros entre los que destacan: *La Tierra en movimiento*, *En busca de la doble hélice*, *En busca del gato de Schrödinger* y *El clima futuro*, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.